

Распределение химических элементов  
в верхней части континентальной коры

---

Chemical element distribution in the upper  
continental crust

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES • URAL BRANCH  
INSTITUTE OF GEOLOGY AND GEOCHEMISTRY

N.A. Grigoriev

CHEMICAL ELEMENT  
DISTRIBUTION IN THE UPPER  
CONTINENTAL CRUST

EKATERINBURG  
2009

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК • УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОХИМИИ

Н.А. Григорьев

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ  
ЭЛЕМЕНТОВ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ  
КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

ЕКАТЕРИНБУРГ  
2009

**Grigoriev N.A. Chemical element distribution in the upper continental crust.** Ekaterinburg: UB RAS, 2009.

The present paper is the continuation of the author's monograph "Introduction into mineralogical chemistry", (Ekaterinburg, UB RAS, 1999). The results are published concerning the development of rather detailed fragment of the earth crust chemical structure model of A.B. Ronov, A.A Migdisov and A.A. Yaroshevsky (1990) into a mineralogogeochemical model of the upper continental crust. Calculations are made on the published in literature results of many thousands determinations of chemical element compositions in rocks , as well as more than 3400 quantitative mineralogical analyses of rock samples. New more detailed data is presented on middle chemical and mineral composition of the upper continental crust, its layers (sedimentary and granite-gneissic) and the rocks composing them. New values of middle compositions of 71 elements in these objects are given. It is characterized a chemical element mass distribution in the association of rocks presenting the upper continental crust and in mineral associations presenting the rocks. Middle compositions of 276 minerals and their varieties, as well as three non-mineral substances in the upper continental crust, in its layers and in the composing them rocks are cited.

Mass shares are determined of Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, B, Al, C, Si, Sn, Pb, P, As, Sb, Bi, O, S, F, Cl, Cu, Ag, Au, Zn, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Yb, Lu, Th, U, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni concentrated in potentially commercial minerals containing in the rocks. The results obtained give the first views on rocks as of possible reserve of the potential mineral raw materials, as well as of the containing here masses of substances dangerous for the environment.

The paper is aimed at geologists, geochemists, mineralogists and on specialists dealing with problems of mineral resources and environmental control.

Editor-in-chief:

doctor of geol.-min. sciences, prof. **V.N. Sazonov**

Reviewer

doctor of geol.-min. sciences **V.V. Kholodnov**

© Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of Russian Academy of Sciences, 2009  
© Grigoriev N.A., 2009

Григорьев Н.А. **Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры.** Екатеринбург: УрО РАН, 2009.

Настоящая работа – продолжение монографии автора «Введение в минералогическую геохимию» (Екатеринбург: УрО РАН, 1999). Публикуются результаты развития несколько детализированного фрагмента модели химического строения земной коры А.Б. Ронова, А.А. Ярошевского и А.А. Мигдисова (1990) в минералогическую модель верхней части континентальной коры. Расчеты выполнены по опубликованным в литературе результатам многих тысяч определений содержания химических элементов в горных породах, а также больше чем 3400 количественных минералогических анализов проб горных пород.

Приведены новые наиболее подробные данные о среднем химическом и минеральном составе верхней части континентальной коры, ее слоев (осадочного и гранитно-гнейсового) и слагающих их горных пород, а также новые значения среднего содержания 71 химического элемента в этих объектах. Характеризуется распределение масс химических элементов в ассоциациях горных пород, представляющих верхнюю часть континентальной коры, и в ассоциациях минералов, слагающих горные породы. Приведены средние содержания 276 минералов и их разновидностей, а также трех неминеральных веществ в верхней части континентальной коры, в ее слоях и в слагающих их горных породах. Определены доли масс Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, B, Al, C, Si, Sn, Pb, P, As, Sb, Bi, O, S, F, Cl, Cu, Ag, Au, Zn, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Yb, Lu, Th, U, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, сконцентрированных в потенциально промышленных минералах, содержащихся в горных породах. Полученные результаты дают новое представление о горных породах как о потенциальном резерве минерального сырья, а также о содержащихся в них массах веществ, опасных для окружающей среды.

Работа рассчитана на геологов, геохимиков, минералогов, специалистов, занимающихся проблемами охраны окружающей среды и оценкой минеральных ресурсов.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 09-05-12035-офи\_м. «Нетрадиционные и новые типы месторождений золота и платиноидов».*

Ответственный редактор

доктор геолого-минералогических наук профессор **В.Н. Сазонов**

Рецензент

доктор геолого-минералогических наук **В.В. Холоднов**

ISBN 978-5-7691-2083-1

© Институт геологии и геохимии  
УрО РАН, 2009 г.

© Григорьев Н.А., 2009 г.

ISBN 978-5-7691-2083-1

Предлагаемая вниманию читателя монография Н.А. Григорьева – это результат почти 40-летних исследований по проблеме минералогической геохимии верхней части континентальной коры. Книга основана на большом количестве данных о вариациях химического и минерального состава горных пород и руд, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, а также авторских. В работе продемонстрирован широкий подход к проблеме. Выбрана, апробирована и отчасти модернизирована модель верхней части континентальной коры. Получены наиболее подробные из существующих данные о среднем химическом и минеральном составе горных пород. Определено распределение масс химических элементов в ассоциациях горных пород и в ассоциациях минералов, их слагающих.

Актуальность работы, представленной на суд специалистов-геологов, а также других лиц, интересующихся состоянием проблемы минералогической геохимии верхней части континентальной коры как объекта, «вмещающего» современную земную цивилизацию, определяется двумя причинами.

Первая – знание распределения масс химических элементов в ассоциациях горных пород и минералов, слагающих горные породы, – будет крайне необходимо в ближайшем будущем в условиях истощения запасов традиционных полезных ископаемых для перевода «пустых пород» в разряд руд (кстати, этот процесс уже идет). Они необходимы и для определения перспектив поисков и разведки крупнообъемных месторождений, которые могут экономически выгодно отрабатываться при значительно меньших, чем прежде, средних и бортовых содержаниях полезных компонентов. В связи с этим представляет интерес выделение максиминералов – абсолютных минералов-концентраторов и определение величины сконцентрированного в них резерва химических элементов. Автором убедительно показана необходимость, особенно для прикладной геохимии, введения термина «максиминералы», наряду с терминами: «минералы-концентраторы» и «минералы-носители», успешно использованными академиком Л.В. Таусоном при изучении геохимии редких элементов в гранитоидах.

Вторая причина заключается в том, что максиминералы и такие их аналоги, как природные органические вещества, – главные источники антропогенного загрязнения природной среды. Определение их роли как носителей ценных и токсичных химических элементов в масштабах верхней части континентальной коры дает представление о возможных последствиях нерационального использования природных ресурсов.

В работе приведены наиболее подробные данные о среднем содержании 71 химического элемента в важнейших горных породах и долях масс 52 химических элементов, которые сконцентрированы в максиминералах или в

их аналогах. Набор химических элементов определялся их практической значимостью и имеющейся базой исходных данных. Установлено, что максиминералы наиболее ценных химических элементов составляют 7.15%, минералы, наиболее опасные в экологическом отношении, – 0.3%, потенциально извлекаемые массы наиболее ценных или токсичных химических элементов – 1.6% всей массы верхней части континентальной коры. Полученные данные являются основой для анализа и прогноза взаимоотношений в системе природа – цивилизация.

Представления (модельные) о строении и вещественном составе верхней части континентальной коры, несомненно, будут меняться и модернизироваться по мере поступления нового фактического материала. Это вполне естественно. Но полученные автором данные о роли минералов как носителей химических элементов долго будут вписываться в новые модели строения верхней части континентальной коры, хотя их уточнение и дополнение неизбежно. И это мы воспринимаем как дань тому большому труду, который вложил автор монографии в определение минеральных балансов химических элементов в разных субстанциях верхней части континентальной коры, в определение реальной и вероятной роли максиминералов как носителей ценных и токсичных химических элементов.

Работа компактная, написана «телеграфным стилем», насыщена результатами расчетов, выраженными в цифрах. Это требует от читателя повышенного внимания, но работа, несомненно, найдет признание геологов, специалистов-рудников, широкого круга лиц, интересующихся будущим минерально-сырьевой базы и проблемами экологии.

Доктор геолого-минералогических  
наук профессор *В.Н. Сазонов*



## ВВЕДЕНИЕ

---

Цель работы – характеристика распределения масс химических элементов в ассоциации горных пород, представляющих собой верхнюю часть континентальной коры, и в ассоциациях минералов, слагающих важнейшие горные породы. Расчеты выполнены по опубликованным в литературе результатам многих тысяч определений содержаний химических элементов в горных породах, а также больше чем 3400 количественным минералогическим анализам проб горных пород.

Под верхней частью континентальной коры здесь понимается ассоциация осадочного и гранитно-гнейсового слоев континентальных и субконтинентальных блоков земной коры по модели А.Б. Ронова, А.А. Ярошевского и А.А. Мигдисова (1990). Знания о вещественном составе этого важнейшего фрагмента среды нашего обитания оставляют желать лучшего, но ход естественных процессов здесь уже изменен в результате антропогенного воздействия. Воздействие это настолько значительно, что не исключается возможность преобразования среды нашего обитания в искусственную (Галимов, 2001). Вероятно, недалеко то время, когда решение вопроса о естественном или антропогенном происхождении некоторых геологических образований потребует специальных исследований. Этим в значительной мере определяется актуальность получения максимально подробных характеристик среды нашего обитания, сложившейся в результате естественных процессов, особенно верхней части континентальной коры, подвергающейся наиболее интенсивному антропогенному воздействию. Автор надеется, что полученные данные внесут определенный вклад в решение этого вопроса.

В работе приведены новые и наиболее подробные данные о среднем содержании в горных породах H, Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, B, Al, C, Si, Sn, Pb, P, As, Sb, Bi, O, S, F, Cl, Cu, Ag, Au, Zn, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Yb, Lu, Th, U, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni. Еще для нескольких химических элементов получены эпизодические данные. Приведены результаты приблизительных определений средних содержаний 276 минералов и их разновидностей, а также трех неминеральных веществ в изученных объектах. Охарактеризовано распределение масс перечисленных химических элементов в ассоциации горных пород, представляющей верхнюю часть континентальной коры. Приведены результаты приблизительных определений средних минеральных балансов H, O, Si, Al, Fe, Ti, Mg, Ca, Na, K в верхней части континентальной коры, в ее слоях и в слагающих их горных породах. Даны результаты приблизительных определений тех долей масс Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, B, Al, Ga, C, Si, Ge, Sn, Pb, P, As, Sb, Bi, O, S, F, Cl, Cu, Ag, Au, Zn, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Yb, Lu, Th, U, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, которые сконцентрированы в максиминалах (потенциально промышленных минералах). Эти дан-

ные получены для верхней части континентальной коры, ее слоев и важнейших горных пород.

Расчеты выполнены на основе несколько детализированного фрагмента модели химического строения земной коры А.Б. Ронова, А.А. Ярошевского и А.А. Мигдисова (1990). Построенная по результатам геологических съемок с учетом многочисленных определений содержаний главных химических элементов в горных породах до начала XXI в. она оставалась самой подробной, в ней наиболее детально охарактеризованы ассоциации горных пород, представляющие осадочный и гранитно-гнейсовый слои (осадочную и гранитно-метаморфическую оболочки) континентов. Разделение горных пород на группы здесь более детальное, чем в других моделях, разработанных в XX в. Эта детальность была почти достаточна для приблизительного решения вопросов, поставленных автором, поэтому этот фрагмент модели А.Б. Ронова с коллегами (1990) принят автором за основу и несколько детализирован. В этой модели к континентальной коре отнесены собственно континентальные и субконтинентальные блоки. Суммарная их площадь 213 млн км<sup>2</sup>. Верхняя часть континентальной коры разделена на два слоя: осадочный и гранитно-гнейсовый. Граница между ними приблизительно соответствует нижней границе верхнего протерозоя. Средние мощности слоев, км: осадочный – 4.7, гранитно-гнейсовый – 14.1. Считается, что верхний слой сложен осадочными и вулканогенными породами, нижний – магматическими и метаморфическими. В действительности ситуация сложнее (Резанов, 2002). Значительная часть толщ (особенно палеозойских) представлена сложными комбинациями осадочных, магматических и метаморфических пород. Их рассматривают как части осадочного слоя, включающие фрагменты гранитно-гнейсового. Считается, что эти фрагменты представлены метаморфическими породами зеленосланцевой, эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций, интрузивными породами и мигматитами (Лутц, 1975). Этой позиции придерживался и автор, однако его попытки внести в данные А.Б. Ронова с коллегами коррективы, соответствующие отмеченным представлениям, оказались неудачными. Корректность полученных соотношений масс различных горных пород оказалась не выше, чем в исходной модели, поэтому соотношения масс горных пород были приняты в основном по А.Б. Ронову и др. (1990). Группа «Гранитоиды и гранито-гнейсы» разделена на граниты, гранодиориты и гранито-гнейсы. Соотношение масс гранитов и гранодиоритов (с прочими гранитоидами повышенной основности) приняты по А.А. Беусу (1981). Соотношение масс гранитоидов и гранито-гнейсов принято 1:2 (Григорьев, 2000). При таком соотношении средний химический состав группы «Гранитоиды и гранито-гнейсы» по А.Б. Ронову и др. (1990) наиболее близок к тому, который соответствует среднему минеральному составу гранитоидов и гранито-гнейсов по данным минералогических анализов. Гранито-гнейсы учтены как ортометаморфические породы. Ультрабазиты (в основном метаморфизованные) автор по традиции оставил среди магматических пород.

В соответствии с отмеченным, при расчетах были приняты следующие доли масс важнейших групп горных пород. **Осадочный слой, %:** пески и песчаники (включая более грубообломочные осадочные породы и алевроли-

ты) – 5.11; глины и глинистые сланцы (включая мергели с содержанием карбонатов < 50%) – 10.40; карбонатные породы (включая мергели с содержанием карбонатов > 50%) – 3.85; кремнистые породы – 0.33; эвапориты – 0.26; кислые вулканы – 0.44; средние вулканы – 1.13; основные вулканы – 2.11; **всего – 23.63. Гранитно-гнейсовый слой, %:** граниты – 8.21; гранодиориты (включая прочие гранитоиды повышенной основности) – 3.38; базиты – 1.5; сиениты (включая прочие щелочные интрузивные породы) – 0.05; ультрабазиты (включая продукты метаморфизма ультрабазитов) – 0.05; метапесчаники (включая продукты метаморфизма более грубообломочных пород и кварциты) – 2.92; парагнейсы и парасланцы – 30.56; метакарбонатные породы – 1.13; железистые породы – 0.38; гранито-гнейсы – 23.21; метариолиты – 0.66; метаандезиты – 1.03; metabазиты – 3.29; **всего – 76.37.**

Непрерывный поток новых данных постоянно меняет представления о строении и составе земной коры. И.А. Резановым (2002) предложена новая модель земной коры – комбинация данных А.Б. Ронова с коллегами (1990) и результатов геофизических исследований. И.А. Резановым к континентальной коре отнесены только осадочный и гранитно-гнейсовый слои. Это те же образования, которые составляют верхнюю часть континентальной коры по модели, принятой автором. И.А. Резанов опубликовал два возможных варианта строения и среднего химического состава такой континентальной коры, различающиеся мощностью гранитно-гнейсового слоя: 8 км – в первом и 10 км – во втором. Средние содержания наиболее важных химических элементов в принятом нами варианте верхней части континентальной коры почти соответствуют второму варианту континентальной коры по И.А. Резанову (см. табл. 1.1). Поэтому, а также с учетом мнения А.А. Ярошевского (2006), автор счел возможным завершить расчеты на базе описанного выше фрагмента модели А.Б. Ронова с коллегами (1990). От других опубликованных вариантов среднего химического состава верхней части континентальной коры принятый отличается главным образом несколько меньшими содержаниями Si и большими Ca. Добавим, что при появлении более совершенных моделей строения земной коры в них могут быть использованы все полученные автором данные о роли минералов как носителей химических элементов в горных породах.

Выбранная модель не идеально соответствует задачам, поставленным автором, хотя и является наиболее подходящей основой для их решения. В частности, она не содержит данных о среднем соотношении масс разновидностей горных пород, отличающихся генезисом и геохимической специализацией. Этот недостаток наиболее существен для малых и редких химических элементов. Например, минимальное содержание Au в горных породах отличается от максимального в 10 000 раз. Необходимо также отметить, что среднее содержание 16 химических элементов в важнейших группах горных пород А.Б. Роновым и др. (1990) было пересчитано на сумму 100%, т. е. несколько преувеличено. Среднее содержание H<sub>2</sub>O рассчитано некорректно. Сравним среднее содержание H<sub>2</sub>O по А.Б. Ронову с соавторами (1990): в глинах и глинистых сланцах – 3.93, в карбонатных породах – 2.46%. Автор учитывал отмеченные особенности модели при расчетах.

Главный мотив работы, предлагаемой читателю, – характеристика распределения масс химических элементов в ассоциации горных пород, представляющих верхнюю часть континентальной коры, и в ассоциациях минералов, слагающих горные породы. Такая постановка проблемы наметилась в конце XX в. (Григорьев, 1999). Химический состав земной коры, ее минеральный состав, минеральный баланс химических элементов в горных породах и рудах почти до конца XX в. были самостоятельными проблемами, хотя разрабатывались они не вполне автономно. Вопрос же о среднем минеральном (не геохимическом!) балансе химических элементов в верхней части континентальной коры до работ автора даже не ставился.

Наиболее фундаментальным считали вопрос о среднем химическом составе земной коры, ее слоев и слагающих их горных пород. Здесь концентрировалось основное внимание геохимиков. Общеизвестны классические оценки среднего химического состава этих объектов, сделанные Ф.В. Кларком, В.И. Вернадским, В.М. Гольдшмидтом, А.П. Виноградовым и многими другими геохимиками. Они базировались преимущественно на результатах определений среднего химического состава важнейших магматических пород и на представлениях о геохимическом балансе в земной коре. Однако представление о геохимическом балансе в земной коре пока не соответствует имеющемуся фактическому материалу. Впоследствии А.А. Беус (1981), С.Р. Тейлор, С.М. Мак Леннан (1988), Л.Н. Овчинников (1990), К.Х. Ведеполь (Wedepohl, 1995) и другие исследователи (Rudnick, Gao, 2004) включая и автора (Григорьев, 2003) неоднократно дополняли и уточняли данные о среднем содержании химических элементов в земной коре и ее фрагментах. При этом эти дополнения и уточнения были основаны преимущественно на результатах изучения химического состава всех выделяемых групп горных пород. Но в модели А.Б. Ронова и др. (1990) выделено значительно больше групп горных пород, чем в других моделях, и построена она только на данных о главных химических элементах, что предопределило необходимость дополнения ее данными о средних содержаниях большинства химических элементов в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах. Некоторые результаты были получены автором впервые, о чем более подробно сказано в главе 1.

Значительно меньше внимания уделяли определению среднего минерального состава земной коры и ее частей. Тем не менее в XX в. этот вопрос рассматривался неоднократно (Clarke, 1924; Berg, 1929; Ферсман, 1933; Wedepohl, 1967; Ронов, Ярошевский, 1967; Мейсон, 1971; Nessbitt, Young, 1984; Булах, 1996). Определения минерального состава земной коры и верхних ее слоев проводили путем пересчета химического состава этих объектов на совокупности 6–20 минералов теоретического состава. Автором были предприняты попытки приблизительного определения среднего минерального состава верхней части земной коры и ее фрагментов непосредственно по опубликованным результатам количественных минералогических анализов горных пород, вначале с учетом 41 минерала и трех неминеральных веществ (Григорьев, 1999). Впоследствии учитывалось до 66 минералов (Григорьев, 2007). Установлено, что средний минеральный состав горных пород и верхней части континентальной коры в целом, рассчитанный по ре-

зультатам минералогических анализов, не вполне соответствует среднему химическому составу этих объектов. Предполагалось, что это отчасти результат недостаточной изученности вариаций минерального состава горных пород, особенно осадочных и метаморфических. Кроме того, было показано, что из-за несовершенства преобладающих методик количественного минералогического анализа неизбежно систематическое преуменьшение содержания второстепенных минералов в изучаемых пробах, причем даже приблизительная оценка величин этого преуменьшения не всегда возможна (Григорьев, 1999). Поэтому для получения сбалансированной системы данных пришлось корректировать результаты определений среднего содержания в горных породах 66 наиболее распространенных минералов. Подробнее об этом сказано в главе 1. К приводимым здесь величинам среднего содержания почти всех остальных (акцессорных) минералов в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах необходимо относиться как к минимально возможным.

Начало изучению распределения масс химических элементов в ассоциациях минералов, слагающих горные породы (минеральных балансов химических элементов), положили С.Р. Нокколдс и Р.Л. Митчелл (1952). Максимальный вклад в решение этого вопроса внесли Л.В. Таусон (1961) и его последователи. Итог полувековых исследований в этом направлении был подведен автором в монографии «Введение в минералогическую геохимию» (Григорьев, 1999). Вопрос о средней картине распределения масс химических элементов в ассоциации горных пород, представляющих верхнюю часть континентальной коры, и в ассоциации минералов, слагающих горные породы, фактически рассматривался только автором.

Предлагаемая работа, подводящая итог этим исследованиям, – это продолжение и развитие монографии «Введение в минералогическую геохимию» (Григорьев, 1999). Почти все материалы, опубликованные в монографии, здесь не повторяются, как и характеристики большинства терминов. Главные исключения: представление о роли минералов как концентраторов и носителей химических элементов и формулировка понятия «максиминералы». Деление минералов на концентраторы и носители химических элементов предложил Л.В. Таусон (1960). По его определению, в минералах-концентраторах химический элемент сконцентрирован избирательно. В минералах-носителях находится большая часть массы химического элемента. Но автором установлено, что как в конкретных горных породах, так и в таких больших геологических объектах, как верхняя часть земной коры, главными минералами-носителями химических элементов являются их минералы-концентраторы (Григорьев, 1999). Пока это положение доказано только в отношении главных химических элементов. Остальные элементы изучены недостаточно, но имеющиеся материалы дают основания предполагать, что отмеченное положение распространяется на все химические элементы. В достаточно крупных объектах взаимозависимость функций минералов как концентраторов и как носителей имеет дискретный характер, преимущественно близкий к бимодальному. Это относится к верхней части континентальной коры и к большинству главных химических элементов. Почти вся масса химического элемента, как правило, распределена между двумя груп-

пами минералов-носителей. Первая представлена минералами с содержаниями данного химического элемента от минимальных до умеренно-повышенных, вторая – минералами с содержаниями, приближающимися к максимальному. Эти группы разделены минералами с промежуточными содержаниями исследуемого химического элемента, в которых находится лишь ничтожная часть его массы. Это *интервал нехарактерной концентрации*. В масштабах верхней части континентальной коры первая группа минералов-носителей по формальным признакам (в частности по коэффициенту концентрации КК) состоит из неконцентраторов ( $КК < 1$ ) и концентраторов ( $КК > 1$ ). Неконцентраторы были названы *миниминералами*, концентраторы – *кларкминералами* (Григорьев, 1999). Рациональность такого разделения минералов-носителей первой группы не очевидна, тем более что в конкретных горных породах в зависимости от их минерального состава кларк-минералы могут быть или не быть минералами-концентраторами данного элемента. Однако пока обсуждение этого вопроса неактуально.

В теоретическом и, особенно, в практическом отношениях первостепенный интерес представляют минералы-концентраторы второй группы, названные *максиминералами*. Максиминералы – абсолютные минералы-концентраторы химических элементов. Если в горной породе есть максиминералы данного химического элемента, то они практически всегда являются его минералами-концентраторами. Это положение справедливо и в отношении большинства видов минерального сырья. Исключение – вещества, состоящие практически из одних только максиминералов данного химического элемента. В таких веществах минералами-концентраторами могут быть не все присутствующие максиминералы. Определение роли максиминералов как носителей масс химических элементов – главная цель данной работы (Григорьев, 1999).

На гистограммах распределения масс большинства достаточно изученных химических элементов максиминералы отделены от других минералов-концентраторов интервалами нехарактерной концентрации. Пример – распределение массы Fe в ассоциации минералов, представляющих собой верхнюю часть континентальной коры (см. главу 15). Почти вся масса Fe в горных породах сосредоточена в двух группах минералов. Первая – минералы со средним содержанием Fe от 0.1 до 24.1%, в которых находится 77.54% от всей массы Fe, вторая – минералы со средним содержанием Fe от 35.59 до 71.6%. Это максиминералы. В них сосредоточено 20.45% всей массы Fe. В минералах со средним содержанием Fe 24.2–35.5% находится всего 0.05% от его массы. Это интервал нехарактерной концентрации. Отмеченное положение, вероятно, распространяется на абсолютное большинство химических элементов. Но интервалы нехарактерной концентрации могут быть установлены только в том случае, если определены средние минеральные балансы химических элементов в таких крупных объектах, как земная кора в целом или верхняя часть континентальной коры. К сожалению, такие минеральные балансы относительно корректно определены только для главных химических элементов, определение их для других химических элементов пока либо не обеспечено необходимыми исходными данными, либо требует постановки специальных трудоемких исследований. Поэтому для при-

близительного определения граничного (минимального для максиминералов) содержания данного химического элемента предложена формула

$$C_{\text{гр}} = \sqrt{C_{\text{макс}} \cdot C_{\text{ср}}},$$

где величины содержания химического элемента, %:  $C_{\text{гр}}$  – граничное (минимальное для максиминералов),  $C_{\text{макс}}$  – максимальное в относительно распространенных собственных минералах данного элемента,  $C_{\text{ср}}$  – среднее в верхней части земной коры (Григорьев, 1999).

Максиминералы – это продукты максимальной дифференциации вещества (в данном случае – земной коры), поэтому вопрос о том, в какой мере массы химических элементов сконцентрированы в таких продуктах, прежде всего важнейший вопрос теоретической геохимии.

Есть и другая сторона дела. Максиминералы – реальные или потенциальные источники получения химических элементов и их соединений. Многие из них опасны для окружающей среды. Использование максиминералов в качестве источников химических элементов и их соединений было основой развития цивилизаций с незапамятных времен. И сейчас технологии извлечения химических элементов и их соединений из минерального сырья включая и только еще проектируемые, ориентированы почти исключительно на использование максиминералов. Исключения есть, но их мало. Примерами могут служить бишофит, карналлит и кизерит – перспективные источники Mg, не являющиеся его максиминералами. Еще пример – перспективный источник Al досонит, тоже не являющийся алюминиевым максиминералом. Но в масштабах верхней части континентальной коры роль подобных минералов как носителей химических элементов очень мала.

В производство постоянно вовлекаются новые максиминералы. Уменьшение запасов традиционного минерального сырья компенсируется вовлечением в производство горных пород с повышенным содержанием максиминералов. Требования к запасам минерального сырья возрастают, а к содержанию максиминералов в нем – уменьшаются. Для определения перспектив и последствий этой тенденции необходимо знание того резерва химических элементов, который сконцентрирован в максиминералах горных пород. Особенно актуально это в отношении наиболее доступной для нас верхней части континентальной коры. Публикуемые в монографии данные дают первое представление об этом резерве. Кроме того, необходимо учесть, что многие максиминералы – главные первоисточники веществ, загрязняющих среду обитания, поэтому определение их роли в качестве носителей токсичных химических элементов дает некоторое представление о возможных последствиях нерационального оперирования природными ресурсами.

Автор рассматривает полученные данные как очередной шаг на пути познания состава среды, в которой мы живем. Они нуждаются в дальнейшей детализации и уточнениях.

Автор благодарит директора Института геологии и геохимии УрО РАН академика В.А. Коротеева, обеспечившего возможность проведения данных исследований, а также всех сотрудников Института геологии и геохимии, оказавших неоценимую помощь в подготовке монографии.

## **Глава 1**

# **СРЕДНИЙ СОСТАВ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ, ЕЕ СЛОЕВ И СЛАГАЮЩИХ ИХ ГОРНЫХ ПОРОД**

---

### **1.1. СРЕДНИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ**

#### **1.1.1. Исходные данные**

Данные о среднем химическом составе верхней части континентальной коры постепенно дополняются и уточняются, и все-таки они оставляют желать лучшего. Основные причины: недостаточная детальность разделения горных пород на группы и недостаток данных о вариациях содержания многих химических элементов в выделяемых группах горных пород. Здесь характеризуется состояние изученности несколько детализированного фрагмента наиболее корректной и детальной модели земной коры А.Б. Ронова и соавторами (1990). Ими было учтено среднее содержание 11 химических элементов в важнейших горных породах осадочного и гранитно-гнейсового слоев и еще 5 химических элементов в большинстве горных пород. Эти данные дополнялись данными Л.Н. Овчинникова (1990) о среднем содержании большинства химических элементов в магматических породах, которые могли быть использованы в модели А.Б. Ронова с коллегами. Литературные данные о среднем содержании большинства химических элементов в остальных горных породах были неполны, а часть их, относящаяся к осадочным и вулканогенным породам, некорректна (совместно учтены результаты анализов неметаморфизованных и метаморфических пород).

Первая попытка существенного дополнения и уточнения данных о химическом составе горных пород, слагающих верхнюю часть континентальной коры, предпринята автором (Григорьев, 2002, 2003б). Было рассчитано среднее содержание большинства химических элементов в осадочных, вулканогенных и метаморфических породах (некоторые данные получены впервые). На основании этих расчетов получены значения среднего содержания большинства химических элементов в верхней части континентальной коры, соответствующие модели А.Б. Ронова с коллегами. Ниже отмечены наиболее важные первоисточники, из которых заимствовано не меньше 90% исходных данных.

Среднее содержание H, Na, K, Mg, Ca, Al, P, C, Si, O, S, F, Cl, Ti, Mn, Fe в осадочных породах, базитах, сиенитах, ультрабазитах, метабазитах и параметаморфических породах – по А.Б. Ронову с соавторами (1990) с неболь-



шими поправками. Поправки компенсировали некорректный пересчет суммарного содержания 10–16 учтенных элементов на 100%.

В вулканитах осадочного слоя средние содержания Na, K, Mg, Ca, Al, P, Si, O, Ti, Mn, Fe – тоже по А.Б.Ронову с соавторами (1990), с небольшими поправками. Средние содержания Н, С, S, F, Cl были определены преимущественно по данным о химическом составе следующих горных пород: четвертичных лав Камчатки, Курильских островов, Японии и меловых вулканитов Охотского побережья (Апрелков и др., 1963; Бондаренко, Хотин, 1963; Набоко, 1963; Шатков, 1975); липаритов, обсидианов, перлитов Кавказа (Одикадзе, 1973); меловых кислых, средних и основных вулканитов Охотского побережья (Сперанская, 1963); девонских липаритов Алтая (Пугачева, 1981). Среднее содержание всех отмеченных элементов в гранитах и гранодиоритах было принято по А.А. Беусу (1981). В гранито-гнейсах оно определено по данным о составе совокупности гранитоидов и гранито-гнейсов (Ронов и др., 1990) и гранитоидов (Беус и др., 1981). При расчете среднего содержания всех отмеченных элементов в метариолитах были использованы в основном данные А.Б. Ронова с соавторами (1990). Кроме них учтены данные О.А. Богатикова с коллегами по докембрийским метавулканитам Балтийского щита (Магматические..., 1987), Р.Г. Язевой и В.В. Бочкарева (1995, 1998) по палеозойским метавулканитам Урала; И.П. Пугачевой с соавторами (1981) по девонским метавулканитам Алтая. При расчете среднего содержания отмеченных элементов в метаандезитах использованы в основном данные по Балтийскому щиту (Магматические..., 1987; Козлов, Иванов, 1995; Мирская, 1980), Уралу (Бушляков, Соболев, 1976; Язева, Бочкарев, 1995, 1998), Алтаю (Пугачева и др., 1981).

Среднее содержание всех химических элементов, кроме отмеченных выше, в гранитах, гранодиоритах, сиенитах, базитах, ультрабазитах было принято по Л.В. Овчинникову (1990). Среднее содержание их в остальных горных породах рассчитано автором с использованием в основном материалов, перечисленных ниже. Отметим, что использование их было осложнено тем, что во многих публикациях метаморфическим породам даны названия исходных осадочных и вулканогенных. При выяснении действительной природы горных пород автор ориентировался на их минеральный состав и геологическую позицию. При отсутствии надежных критериев приходилось доверять авторам описаний.

**Li, Rb, Cs.** За основу принято обобщение Н.А. Солодова с коллегами (1986), учтены также данные других исследователей. Это преимущественно результаты анализов следующих горных пород.

*Пески, песчаники, глины, глинистые сланцы, карбонатные породы осадочного слоя:* мезозойские гравеллиты, песчаники, алевролиты, аргиллиты, глины, известняки, доломитистые известняки, мергели Таджикской депрессии (Адамчук и др., 1977); пермские аркозовые песчаники Колорадо и Юты (Van de Kamp, Leake, 1994); песчанистые породы (от юры до архея) Центрального Казахстана (Глухан, Серых, 2000); нижнепалеозойские глинистые сланцы, известняки, доломиты Тянь-Шаня (Гавшин, Бахтуров, 1989); рифейские мергелистые филлиты, мергели, известняки, доломиты западного склона Южного Урала (Сульман, Берсенева, 1982); гравелиты,

песчаники, алевролиты, аргиллиты венда Сибирской платформы (Никитин, Мельников, 1989).

*Кремнистые породы:* вендско-кембрийские спонголиты и фтаниты Каратау в Казахстане (Холодов, 1973); палеозойские силициты Тянь-Шаня (Гавшин, Бахтуров, 1989).

*Эвапориты* – по Т.Ф. Бойко (1973).

*Вулканиды:* современные дациты, андезиты, андезито-базальты, базальты Камчатки и Курильских островов (Леонова, Удальцова, 1970); кайнозойские перлиты, обсидианы, липариты, риолиты, риодациты, андезиты, андезито-дациты, дациты, латиты, андезито-базальты, базальты Кавказа (Одикадзе, 1973; Карапетян, 1981; Геохимия континентального..., 1987); юрские и меловые эффузивы Забайкалья (Лебедева, 1981; Лебедева, Шаткова, 1975); пермско-мезозойские базальты Западно-Сибирской низменности (Кременецкий, Гладких, 1997); базальты (траппы) Сибирской платформы (Нестеренко-Фролова, 1965; Нестеренко, Альмухамедов, 1973); среднекарбонные липарит-дациты, дациты, андезиты Таджикистана (Петрография Таджикистана, 1986).

*Метапесчаники:* вендско-силурийские метапесчаники Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); палеозойские метапесчаники из Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); раннепротерозойские кварциты Южной Африки (Wronkiewicz, Kondie, 1990); докембрийские метапесчаники Русской платформы (Кременецкий, Овчинников, 1986).

*Парасланцы и парагнейсы:* метаморфизованные палеозойские глинистые сланцы и алевролиты Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); вендско-силурийские метапелиты Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); биотит-силлиманитовые гнейсы Западных Альп (Sighinolfi, 1976); парагнейсы и парасланцы Среднего Урала, Кольского полуострова, Южной Австралии (Ставров, 1978); докембрийские метапелиты Восточной Сибири, Украинского и Балтийского щитов, Лапландского пояса (Макрыгина, Петров, 1975; Кременецкий, Овчинников, 1986; Литология..., 1974); протерозойские и архейские парасланцы Северной Америки, Африки, Антарктиды (Коллерсон и др., 1980; Gromet et al., 1984; Wronkiewicz, Kondie, 1990).

*Карбонатные метаморфические породы:* палеозойские доломиты Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); докембрийские кальцитовые и доломитовые мраморы и кальцифиры Прибайкалья (Макрыгина и др., 1994; Петрова, Левицкий, 1984); докембрийские карбонатные породы Кольского полуострова (Кременецкий, Овчинников, 1986).

*Железистые породы:* железистые кварциты Кривого Рога, и Курской магнитной аномалии (Ганзеев и др., 1977); кварциты (~ 7% Fe) Прибайкалья (Петрова и др., 1995).

*Гранито-гнейсы:* гранито-гнейсы и плагиогнейсы Мугоджар в Казахстане (Миловский и др., 1985); ортогнейсы и мигматиты Среднего Урала, Кольского полуострова, Южной Австралии (Ставров, 1978), Алданского щита (Лутц, 1975), штата Нью-Йорк (Whitney, 1984), Прибайкалья (Макрыгина, Петрова, 1996); архейские плагиогнейсы, плагиомигматиты, диорито-гнейсы Курской магнитной аномалии, Мугоджар (Миловский и др., 1985), Русской платформы (Кременецкий, Овчинников, 1986), Гренландии (Ламберт, Холланд, 1980; Тарни, 1980), Лабрадора (Коллерсон и др., 1980).

*Метариолиты*: палеозойские на Южном Урале (Мельникова, 1981; Бобохов, 1987), раннекембрийские Западного Забайкалья (Литвиновский, Занвилевич, 1976), протерозойские Восточного Саяна (Мехоношин, 1987); кислые гранулиты и метадациты Анабарского щита (Лутц, 1975) и Кольского полуострова (Кременецкий, Овчинников, 1986).

*Метаандезиты*: палеозойские на Урале (Мельникова, 1981), раннекембрийские Западного Забайкалья (Литвиновский, Занвилевич, 1976); эндебиты Анабарского щита (Лутц, 1975); верхнеархейские Восточной Карелии (Костин, 1985) и Кольского полуострова (Кременецкий, Овчинников, 1986).

*Метабазиты*: нижнекаменноугольные зеленокаменные сланцы по андезито-базальтам Таджикистана (Петрография Таджикистана, 1986); девонские метагабброиды и метадиабазы Северного Казахстана (Кузьмин, Альмухамедов, 1987); докембрийские зеленые сланцы Норвегии (Grenne, Roberts, 1980); докембрийские горнблендиты и амфиболиты Восточной Сибири (Гаврикова и др., 1995); протерозойские и архейские метагабброиды и метабазальты Восточного Саяна (Мехоношин, 1987), Алданского и Анабарского щитов (Пухтель, Журавлев, 1993; Лутц, 1975); протерозойские и архейские ортоамфиболиты, метабазальты и метадиабазы Русской платформы (Кременецкий, Овчинников, 1986), Южной Финской Лапландии (Сахама, 1952); архейские амфиболиты Гренландии, Шотландии, Лабрадора (Риваленти, 1980; Тарни, 1980; Коллерсон, 1980).

**Be, Sr, Ba.** За основу приняты: для Be – 3959 количественных анализов уральских горных пород, для Sr – обобщение Н.А. Солодова с соавторами (1986). В отношении всех трех элементов использованы имеющиеся результаты анализов горных пород из публикаций, отмеченных в предыдущем разделе и перечисленных ниже.

*Пески, песчаники, глины, глинистые сланцы, карбонатные породы*: кайнозойские песчаники, алевролиты, аргиллиты южной части Сахалина (Захарова, Воронина, 1976); верхнепермские и карбоновые гравелиты, песчаники, алевролиты, аргиллиты, мергели, а также верхнерифейские доломиты и известняки Предуралья (Юдович и др., 1972; Кетрис и др., 1972; Герцен, 1972); рифейские глинистые сланцы, известняки, доломиты западного склона Южного Урала (Гареев, Веретенникова, 1987).

*Эвапориты* – Be и Ba по Т.Ф. Бойко (1973), Sr – по Н.А. Солодову с соавторами (1986).

*Вулканыты*: четвертичные кислые лавы, дациты, андезиты, андезито-базальты, базальты Курильских островов (Горкун и др., 1963); мезозойские и пермские базальты Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6 (Кременецкий, Гладких, 1997).

*Метапесчаники*: докембрийские Южной Финской Лапландии (Сахама, 1952) и Курской магнитной аномалии (Созинов и др., 1988).

*Парагнейсы и парасланцы*: вендско-силурийские метапелиты Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); докембрийские углеродистые сланцы Курской магнитной аномалии (Созинов, 1988); метапелиты и парагнейсы Восточной Сибири, Воронежского кристаллического массива, Северного Приладожья, Лапландского пояса (Геохимия магматизма..., 1982; Саха-

ма, 1952; Лебедев, Нагайцев, 1980; Болотов, Иванов, 1980); докембрийские парагнейсы Дальнего Востока (Говоров и др., 1970) и Монтаны (Buttler, 1966).

*Карбонатные метаморфические породы:* палеозойские и докембрийские мраморы и кальцифиры Южного Урала (Сначев, Рачев, 1991) и Патомского Нагорья (Литоология..., 1974).

*Гранито-гнейсы:* докембрийские мигматиты гранитного состава Украинского щита (Резников, Ишевская, 1972); верхнеархейские плагиогнейсы Дальнего Востока (Говоров и др., 1970); докембрийские гранито-гнейсы Монтаны (Buttler, 1966) и Южной Финской Лапландии (Сахама, 1952).

*Метариолиты* (металипариты): раннедокембрийские Западного Забайкалья (Литвиновский, Занвилевич, 1976); Восточного Лабрадора (Коллерсон и др., 1980).

*Метаандезиты* (и метадациты): палеозойские Тагильского и Магнитогорского погружений на Урале (Мельникова, 1981); раннекембрийские Западного Забайкалья (Литвиновский, Занвилевич, 1976), архейские Восточной Карелии (Костин, 1985), Кольского полуострова (Болотов, Иванов, 1980).

*Метабазиты:* пироксен-амфиболовые сланцы Прибайкалья (Макрыгина и др., 1992; Макрыгина, Петрова, 1996); девонские метабазальты Магнитогорского прогиба на Урале (Горожанина, 1992); позднерифейские метабазиты Алданского щита (Алексеев, Каминский, 1971); докембрийские амфиболиты Монтаны (Buttler, 1966).

**В, Ga.** За основу приняты обобщения А.Ф. Горбова (1976) и Л.А. Борисенок (1971). Поправки и дополнения рассчитаны по результатам анализа горных пород, перечисленных ниже.

*Пески, песчаники, глины, глинистые сланцы, карбонатные породы:* мезозойские гравелиты, песчаники, алевролиты, аргиллиты, глины, известняки, доломитистые известняки, мергели Таджикской депрессии (Адамчук и др., 1977); мезозойские песчаники, алевролиты, аргиллиты Восточной Сибири (Гуляева, Лыгалова, 1965; Поделько, 1965); мезозойские и палеозойские терригенные породы Верхоянско-Чукотской складчатой области (Некрасов, 1966); пермские аркозовые песчаники Колорадо и Юты (Van de Kamp, Leake, 1994); верхнепермские и карбоновые песчаники, гравелиты, алевролиты, аргиллиты, мергели Тимано-Печорской провинции (Юдович и др., 1972; Кетрис и др., 1972); песчанистые породы, алевролиты и аргиллиты (от юры до архея) Центрального Казахстана (Глухан, Серых, 1999, 2000); палеозойские конгломераты, песчаники, алевролиты, глины, аргиллиты, мергели, известняки Приуралья (Поделько, 1975; Поделько, Лыгалова, 1970); палеозойские доломиты и известняки Сибирской платформы (Ларичев и др., 1989).

*Кремнистые породы.* Условно использованы результаты анализов метаморфизованных хемогенных и органогенных кремнистых осадков Урала (Смирнов, Пумпянский, 1971) и Казахстана (Сараев, 1980).

*Эвапориты* – по Т.Ф. Бойко (1973), А.Ф. Горбову (1976), А.И. Ларичеву с соавторами (1989), а также результаты анализов мезозойских гипсов Таджикской депрессии (Адамчук и др., 1977).

*Вулканисты:* кайнозойские эффузивы Кавказа (Карапетян, Меликсетян, 1981); четвертичные кислые лавы, дациты, андезиты, андезито-базальты, базальты Курильских островов (Горкун и др., 1963); вулканисты Забайкалья и Монголии (Антипин и др., 1982; Лебедева, 1981); мезозойские трахилипариты, липарито-дациты, андезиты, диабазы Верхоянско-Чукотской складчатой зоны (Некрасов, 1966).

*Метапесчаники:* вендско-силурийские (включая яшмы) Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); палеозойские из Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); кембрийские и протерозойские парагнейсы Приморья (Говоров и др., 1970); докембрийские кварциты и кварцитосланцы Прибайкалья (Петрова и др., 1995); докембрийские метапесчаники Русской платформы и Финской Лапландии (Болотов Иванов, 1980; Кременецкий, Овчинников, 1986; Созинов и др., 1988; Сахама, 1952).

*Парасланцы и парагнейсы:* метаморфизованные палеозойские глинистые сланцы и алевролиты Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); вендско-силурийские метapelиты Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); докембрийские метapelиты Восточной Сибири, Украинского щита, Русской платформы, Лапландского пояса (Болотов, Иванов, 1980; Геохимия магматизма..., 1982; Кременецкий, Овчинников, 1986; Поделько, Лыгалова, 1970; Созинов и др., 1988; Сахама, 1952; Литология..., 1974).

*Карбонатные породы:* палеозойские доломиты Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); докембрийские кальцитовые и доломитовые мраморы и кальцифиры Прибайкалья (Макрыгина и др., 1994); докембрийские карбонатные породы Русской платформы и Лапландского пояса (Кременецкий, Овчинников, 1986; Сахама, 1952; Созинов и др., 1988).

*Железистые породы:* железистые кварциты Кривого Рога, Курской магнитной аномалии (Ганзеев и др., 1977) и Казахстана (Ситько и др., 1971).

*Гранито-гнейсы:* гранито-гнейсы, плагиогранито-гнейсы, мигматиты Прибайкалья (Макрыгина, Петрова, 1996); архейские гранито-гнейсы, плагио-гнейсы и плагио-мигматиты, диорито-гнейсы Курской магнитной аномалии и Мугоджар в Казахстане (Миловский и др., 1985), Русской платформы и Лапландского пояса (Кременецкий, Овчинников, 1986; Поделько, Лыгалова, 1970; Сахама, 1952).

*Метариолиты* (метадациты) Кольского полуострова (Кременецкий, Овчинников, 1986).

*Метаандезиты:* докембрийские Прибайкалья (Макрыгина и др., 2000); верхнеархейские Кольского полуострова (Болотов, Иванов, 1980; Кременецкий, Овчинников, 1986).

*Метабазиты:* позднерифейские Алданского щита (Алексеев, Каминский, 1971); протерозойские и архейские ортоамфиболиты, метабазальты и метадиабазы Русской платформы (Кременецкий, Овчинников, 1986); докембрийские (включая пироксен-амфиболовые сланцы) Прибайкалья (Макрыгина и др., 1992, 2000; Макрыгина, Петрова, 1996); Южной Финской Лапландии (Сахама, 1952).

**Ип.** Основа – обобщение данных Д.М. Шоу (Shay, 1952), Т.А. Линн и Р.А. Шмитт (Handbook... 11–3, 1972). Учтены данные Л.Н. Овчинникова

(1990) по глинистым сланцам, Т.Ф. Бойко (1973) по эвапоритам, Н.И. Волковой с соавторами (1994) по парасланцам.

**Tl.** Основа – данные Д.М. Шоу (Shay, 1952). Учтены также данные Н.И. Волковой с соавторами (1994), В.В. Макрыгиной, Б.В. Петрова (1975), Ю.Н. Каперской (1977) по парасланцам и парагнейсам.

**Ge.** Основа – данные С.А. Эль Вардани (El Wardani, 1957). Использованы данные из обобщения В.В. Иванова (1996, кн. 3). Эвапориты – по Т.Ф. Бойко (1973). Учтены результаты анализов кислых вулканитов (Карапетян, Меликсетян, 1981); метапесчаников, парасланцев, карбонатных метаморфических пород (Петрова, Левицкий, 1984; Волкова и др., 1994; Кременецкий, Овчинников, 1986); железистых пород (Ситько и др., 1971).

**Sn, Pb.** Использованы результаты анализов горных пород, перечисленных выше (см. В, Ga, Tl, Ge) и ниже.

*Пески, песчаники, глинистые сланцы, карбонатные породы:* мезозойские и палеозойские терригенные породы Верхоянско-Чукотской складчатой зоны (Некрасов, 1966); гравелиты, песчаники, алевролиты, аргиллиты венда Сибирской платформы (Никитин, Мельников, 1989).

*Вулканиды:* кайнозойские кислые эффузивы Кавказа (Геохимия континентального..., 1987); мезозойские трахилипариты, липарито-дациты, кварцевые порфиры, андезиты, дациты, диабазы Верхоянско-Чукотской складчатой области (Некрасов, 1966); среднекарбонные липарит-дациты Таджикистана (Петрография Таджикистана, 1986).

*Метапесчаники* – раннепротерозойские кварциты Южной Африки (Wronkiewicz, Kondie, 1990).

*Парасланцы и парагнейсы:* протерозойские кристаллические сланцы Верхоянско-Чукотской складчатой зоны (Некрасов, 1966); протерозойские и архейские метасланцы Южной Африки (Wronkiewicz, Kondie, 1990); докембрийские парагнейсы и метапелиты Дальнего Востока (Говоров и др., 1970) и Сибири (Макрыгина, Петров, 1975).

*Карбонатные породы:* докембрийские кальцифиры, кальцитовые и доломитовые мраморы Патомского нагорья (Литология..., 1974), Прибайкалья (Макрыгина и др., 1994; Петрова, Левицкий, 1984).

*Гранито-гнейсы:* протерозойские гнейсы Верхоянско-Чукотской складчатой области (Некрасов, 1966); докембрийские мигматиты гранитного состава Украинского щита (Резников, Ишевская, 1972); верхнеархейские плагиогнейсы Дальнего Востока (Говоров и др., 1970); архейские гнейсы Гренландии (Ламберт, Холланд, 1980; Тарни, 1980).

*Метаандезиты* среднекаменноугольные Таджикистана (Петрография Таджикистана, 1986).

*Метабазиты* силурийские Южного Урала (Иванов, 1982); протерозойские и архейские Восточного Саяна (Мехоношин, 1987).

**N** – по Л.Н. Овчинникову (1990).

**As, Sb.** Данные Х. Ониси и Э.Б. Санделла (1959), Л.Н. Овчинникова (1990), С.Г. Карапетяна, Б.М. Меликсетяна (1981), Н.И. Волковой с соавторами (1994), L.P. Gromet et al. (1984).

**Bi.** В основном данные Д.Н. Пачаджанова с соавторами (1975), В.П. Федорчука, Э.Ф. Минцера (1990), В.В. Иванова (1996, кн. 3).

**Se.** Для *песков, песчаников, глин, глинистых сланцев и карбонатных пород* за основу приняты средние содержания по В.В. Иванову (1996, кн. 3). Учтены также анализы современных осадков кислородной зоны Черного моря (Волков, Соколова, 1976); карбоновых и девонских песчаников, известняков, доломитов Средней Азии (Сидельникова, Швей, 1970); силурийских диктионемовых сланцев Эстонии (Синдеева, Курбанова, 1958).

*Кремнистые породы* – карбоновые и девонские Средней Азии (Сидельникова, Швей, 1970).

*Эвапориты* – по Т.Ф. Бойко (1973).

*Вулканиды*: четвертичные Камчатки; кайнозойские и пермские Охотско-Чукотского вулканического пояса; триасовые и пермские района Норильска (Иванов, 1996, кн. 3); миоценовые Кавказа, триасовые и палеозойские Восточной Сибири (Синдеева, Курбанова, 1958; Трошин и др., 1987).

*Метапесчаники, парасланцы, карбонатные метаморфические породы* кембрийско-силурийские Средней Азии (Сидельникова, Швей, 1970).

*Метавулканиды*: девонские Тувы (Синдеева, Курбанова, 1958); рифейские Восточной Сибири (Трошин и др., 1987) и Кузнецкого Алатау (Иванов, 1996, кн. 3).

**Te** – по данным из обобщений Л.Н. Овчинникова (1990), В.В.Иванова (1996, кн. 3) и с учетом анализов рифейских и палеозойских горных пород Восточной Сибири (Трошин и др., 1987).

**Br, I.** Используются данные из обобщений А.П. Виноградова (1957), Б.Я. Розена (1970), В.В. Иванова (1996, кн. 3), Я. Мурамацу, К.Х. Ведеполя (Muramatsu, Wedepohl, 1998), а также результаты анализов нижнекембрийских осадочных пород Иркутского амфитеатра (Гуляева, Лыгалова, 1970); отложений венда центральной части Сибирской платформы (Никитин, Мельников, 1989) и нижнеюрских парасланцев Восточного Забайкалья (Гуляева, Захарова, 1965).

**Cu, Zn.** *Пески, песчаники, глины, глинистые сланцы, карбонатные породы*: кайнозойские терригенные отложения Южного Сахалина (Захарова, Воронова, 1976); пермские аркозовые песчаники Колорадо и Юты (Van de Kamp, Leake, 1994); карбоновые терригенные породы Тимано-Печорской провинции (Юдович и др., 1972); песчанистые породы, алевролиты и аргиллиты (от юры до архея) Центрального Казахстана (Глухан, Серых, 1999, 2000); терригенные породы венда Сибирской платформы (Никитин, Мельников, 1989); глинистые и карбонатные породы авзянской свиты на Южном Урале (Гареев, Веретенникова, 1987).

*Кремнистые породы*. Условно использованы результаты анализов метаморфизованных хемогенных и органогенных кремнистых осадков Урала (Смирнов, Пумпянский, 1971) и Казахстана (Сараев, 1980).

*Вулканиды*: четвертичные кислые лавы, дациты, андезиты, андезитобазальты, базальты Курильских островов (Горкун и др., 1963); кайнозойские эффузивы Кавказа (Карапетян, Меликсетян, 1981; Геохимия континентального..., 1987); базальты Сибирской платформы (Нестеренко, Альмухамедов, 1973); карбоновые липарито-дациты, андезито-дациты, андезиты и базальты Таджикистана (Петрография Таджикистана, 1986).

*Метапесчаники*: вендско-силурийские Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); палеозойские из Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); докембрийские метапесчаники Байкало-Патомского нагорья (Развозжаева и др., 1997), Русской платформы, Финской Лапландии (Болотов Иванов, 1980; Кременецкий, Овчинников, 1986; Созинов и др., 1988).

*Парасланцы и парагнейсы*: метаморфизованные палеозойские глинистые сланцы и алевролиты Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); вендско-силурийские метапелиты Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); докембрийские парагнейсы Монтаны (Buttler, 1966); докембрийские метапелиты Байкало-Патомского нагорья (Развозжаева и др., 1997), Восточной Сибири, Украинского щита, Русской платформы, Лапландского пояса (Макрыгина, Петров, 1975; Болотов, Иванов, 1980; Лебедев, Нагайцев, 1980; Геохимия магматизма..., 1982, Кременецкий, Овчинников, 1986; Созинов и др., 1988; Литология..., 1974); архейские парасланцы Восточного Лабрадора (Коллерсон и др., 1980).

*Карбонатные породы*: палеозойские доломиты Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); докембрийские кальцитовые и доломитовые мраморы и кальцифиры Прибайкалья (Макрыгина и др., 1994; Петрова, Левицкий, 1984); докембрийские карбонатные породы Русской платформы (Литология..., 1974; Кременецкий, Овчинников, 1986; Созинов и др., 1988).

*Железистые породы*: железистые кварциты Кривого Рога, Курской магнитной аномалии (Ганзеев и др., 1977) и Казахстана (Ситько и др., 1971); кварциты (~ 7% Fe) Прибайкалья (Петрова и др., 1995).

*Гранито-гнейсы*: гнейсы и мигматиты Прибайкалья (Макрыгина, Петрова, 1996), Дальнего Востока (Говоров и др., 1970), Украинского щита (Резников, Ишевская, 1972), Курской магнитной аномалии и Мугоджар (Миловский и др., 1985); Русской платформы (Кременецкий, Овчинников, 1986), Монтаны (Buttler, 1966), Гренландии (Ламберт, Холланд, 1980), Лабрадора (Коллерсон и др., 1980).

*Метариолиты* (метадациты): протерозойские Восточного Саяна (Мехоношин, 1987), Восточного Лабрадора (Коллерсон и др., 1980), Кольского полуострова (Кременецкий, Овчинников, 1986).

*Метаандезиты*: докембрийские Прибайкалья (Макрыгина и др., 2000); верхнеархейские Кольского полуострова (Болотов, Иванов, 1980; Кременецкий, Овчинников, 1986).

*Метабазиты*: нижнекарбоновые зеленокаменные сланцы по андезитобазальтам Таджикистана (Петрография Таджикистана, 1986); девонские метаморфизованные базальтоиды Магнитогорского мегасинклинория (Салихов и др., 1987); позднерифейские Алданского щита (Алексеев, Каминский, 1971); докембрийских амфиболитов Среднего Приднестровья (Танатар-Бараш, Дудник, 1977); протерозойские и архейские ортоамфиболиты, метабазациты и метадиабазы Русской платформы (Кременецкий, Овчинников, 1986; Танатар-Бараш, Дудник, 1977); докембрийские метабазиты и пироксен-амфиболовые сланцы Прибайкалья (Макрыгина и др., 1992, 2000; Макрыгина, Петрова, 1996); протерозойские и архейские метабазациты Восточного Саяна (Мехоношин, 1987); докембрийские амфиболиты Монтаны (Buttler, 1966); архейские амфиболиты Лабрадора (Коллерсон, 1980).



**Ag, Au.** Использованы данные из (Handbook..., 1974) и результаты анализов горных пород, перечисленных ниже.

*Пески, песчаники, глины, глинистые сланцы и карбонатные породы:* мезозойские и палеозойские осадочные породы Восточной Сибири и Дальнего Востока (Моисеенко и др., 1974); песчанистые породы, алевролиты и аргиллиты (от юры до архея) Центрального Казахстана (Глухан, Серых, 1999, 2000); девонские красноцветные глины Русской платформы (Ахмедов и др., 2000); среднерифейские конгломераты, песчаники, алевролиты, глинистые сланцы, мергели, известняки, доломиты Анабарского щита (Докембрий Анабаро-Алексского..., 1976).

*Вулканиды:* кайнозойские эффузивы Кавказа (Карапетян, Меликсетян, 1981); четвертичные, мезозойские и палеозойские вулканиды Восточной Сибири и Дальнего Востока (Моисеенко и др., 1974; Иванов, 1996, кн. 3; Нестеренко, Альмухамедов, 1973); каменноугольные липарито-дациты, андезиты-дациты, андезиты и базальты Таджикистана (Петрография Таджикистана, 1986); палеозойские Восточной Сибири (Трошин и др., 1987); среднерифейские туффы Анабарского щита (Докембрий Анабаро-Алексского..., 1976).

*Метапесчаники, парасланцы, карбонатные метаморфические породы:* палеозойские из Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); вендско-силурийские метапелиты Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); докембрийские метаморфизованные осадочные породы Сибири, Русской платформы (Ахмедов и др., 2000; Воинов, Полеховский, 1985; Геохимия магматизма..., 1982; Развозжаева и др., 1997; Завьялов и др., 1965; Макрыгина, Петрова, 1994; Сизых, Коткин, 2000); верхнеархейские метаморфизованные терригенные породы Украинского и Анабарского щитов (Коробейников и др., 1996); графитовые гнейсы Приазовья (Усенко и др., 1973).

*Железистые породы:* железистые кварциты Казахстана (Ситько и др., 1971), Украинского щита (Коробейников и др., 1996; Усенко и др., 1973); кварциты (~ 7% Fe) Прибайкалья (Петрова и др., 1995).

*Гранито-гнейсы:* архейские ортогнейсы Балтийского и Украинского щитов (Беляев, 1985; Кременецкий Овчинников, 1986; Резникова, Ишевская, 1972; Усенко и др., 1973); палеозойские ортогнейсы Монголо-Охотской складчатой области (Моисеенко и др., 1974).

*Метавулканиды:* палеозойские Монголо-Охотской складчатой области (Моисеенко и др., 1974); среднерифейские Анабарского щита (Докембрий Анабаро-Алексского..., 1976); рифейские Алтая и Сибири (Коробейников, 1992, 1997; Трошин и др., 1987); протерозойские и архейские Русской платформы (Беляев, 1985; Кременецкий, Овчинников, 1986), Украинского и Алданского щитов (Усенко и др., 1973; Коробейников и др., 1996).

**Cd.** Данные из сводки В.В. Иванова (1997, кн. 5). Кроме того, использованы результаты анализов горных пород, отмеченных ниже: мезозойские глины, обломочные, карбонатные и кремнистые породы Татарстана (Зорина и др., 2000); траппы Сибирской платформы (Нестеренко, Альмухамедов, 1973); гнейсы Антарктиды (Brooks et al., 1960).

**Hg.** Основа – данные А.А. Саукова, Н.А. Озеровой (1965), А.А. Саукова, Н.Х. Айдиньяна (1972), В.З. Фурсова (1977). Кроме того, использованы

результаты анализов горных пород: песков и песчаников Центрального Казахстана (Глухан, Серых, 1999); четвертичных кислых, средних и основных лав Камчатки и Курильских островов (Озерова, Унанова, 1965); вендско-силурийских метапесчаников и метапелитов Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994).

**Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Th, U.** За основу приняты данные: Th и U – А.А. Смыслова (1974), по остальным элементам – В.В. Иванова (1997). В отношении всех элементов учтены результаты анализов горных пород, перечисленных ниже.

*Пески, песчаники, глины, глинистые сланцы, карбонатные породы:* мезозойские песчаники, алевролиты, аргиллиты Западно-Сибирской плиты (Гавшин, Никитин, 1989; Гавшин и др., 1979); юрские пески и глины Енисейского края в Сибири (Кренделев, Бобров, 1970); пермские аркозовые песчаники Колорадо и Юты (Van de Kamp, Leake, 1994); каменноугольные терригенные породы Тимано-Печорской провинции (Юдович и др., 1972); песчанистые породы, алевролиты и аргиллиты (от юры до архея) Центрального Казахстана (Глухан, Серых, 1999, 2000); палеозойские песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки Кузнецкого Алатау (Осипов, Журавлев, 1970); нижнепалеозойские глинистые сланцы, доломиты, известняки Тянь-Шаня (Гавшин, Бахтуров, 1989); рифейские известняки и мергели западного склона Южного Урала (Анфимов, 1997); терригенные породы венда Сибирской платформы (Никитин, Мельников, 1989).

*Кремнистые породы* – нижнепалеозойские кремнистые сланцы Тянь-Шаня (Гавшин, Бахтуров, 1989).

*Эвапориты* – преимущественно кембрийские Сибирской платформы (Гавшин, Никитин, 1989).

*Вулканиды:* четвертичные кислые лавы, липариты, дациты, андезиты, андезито-базальты, базальты Курильских островов и Камчатки (Горкун и др., 1963; Леонова, Удальцова, 1970; Андреев и др., 2001); кайнозойские эффузивы Кавказа (Карапетян, Меликсетян, 1981; Геохимия континентального..., 1987); кайнозойские и позднемиоценовые базальты Северо-Восточной Азии (Федоров, Филатова, 1999); мезозойские базальты, девонские кислые эффузивы и их туфы Кузнецкого Алатау (Осипов, Журавлев, 1970); базальты Сибирской платформы (Нестеренко, Альмухамедов, 1973); триасовые базальты Восточного Забайкалья (Гусев, Песков, 1966); меловые базальтоиды Камчатки (Пузанков и др., 1989); мезозойско-пермские базальты Западной Сибири (Кременецкий, Гладких, 1997); мезозойские или верхнекарбоновые липаритовые порфиры Зауралья (Иванов и др., 1980); палеозойские долериты Сибирской платформы (Гавшин, Никитин, 1989).

*Метапесчаники:* вендско-силурийские (включая яшмы) Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); раннепротерозойские (включая кварциты) Южной Африки (Wronkiewicz, Kondie, 1990); докембрийские (включая конгломераты) Енисейского края (Кренделев, Бобров, 1970); докембрийские Русской платформы, Финской Лапландии (Болотов Иванов, 1980; Кременецкий, Овчинников, 1986; Сахама, 1952; Мыскова и др., 2000); архейские Украинского щита (Белевцев и др., 1976).

*Парасланцы и парагнейсы:* вендско-силурийские метапелиты Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); докембрийские парагнейсы Монтаны (Buttler, 1966); раннепротерозойские метапелиты Южной Африки (Wronkiewicz, Kondie, 1990); докембрийские метапелиты Северной Америки (Gromet et al., 1984); докембрийские парагнейсы и парасланцы Енисейского кряжа (Кренделев, Бобров, 1970), Восточной Сибири, Украинского щита, Русской платформы, Лапландского пояса (Макрыгина, Петров, 1975; Белевцев и др., 1976; Болотов, Иванов, 1980; Геохимия магматизма..., 1982; Кременецкий, Овчинников, 1986; Литология..., 1974); архейские слюдяные сланцы и парагнейсы Балтийского щита (Воинов, Полеховский, 1985).

*Карбонатные метаморфические породы:* палеозойские доломиты Центральных Кызылкумов (Сараев, 1980); докембрийские кальцитовые и доломитовые мраморы и кальцифиры Прибайкалья (Петрова, Левицкий, 1984); докембрийские карбонатные породы Русской платформы (Литология..., 1974; Кременецкий, Овчинников, 1986) и Южной Финской Лапландии (Сахама, 1952).

*Железистые породы:* железистые кварциты Казахстана (Ситько и др., 1971); кварциты (~ 7% Fe) Прибайкалья (Петрова и др., 1995).

*Гранито-гнейсы:* гнейсы и мигматиты Прибайкалья (Макрыгина, Петрова, 1996), Енисейского кряжа (Кренделев, Бобров, 1970), Украинского щита (Белевцев и др., 1976), Курской магнитной аномалии и Мугоджар (Миловский и др., 1985), Русской платформы (Кременецкий, Овчинников, 1986; Мыскова и др., 2000), Южной Финской Лапландии (Сахама, 1952), Гренландии (Ламберт, Холланд, 1980; Тарни, 1980).

*Метариолиты:* палеозойские зеленокаменные кислые метавулканиты Урала (Бобохов, 1987; Мельникова, 1981); протерозойские метариолиты Восточного Саяна (Мехоношин, 1987); метариолиты и метадациты Балтийского щита (Минц, Цьонь, 1997; Кременецкий, Овчинников, 1986).

*Метаандезиты:* архейские Кольского полуострова (Болотов, Иванов, 1980; Кременецкий, Овчинников, 1986; Минц, Цьонь, 1997) и Квебека, Канада (Lidden et al., 1982).

*Метабазиты:* домезозойские амфиболиты северо-востока России (Силантьев и др., 1996); палеозойские метабазальтоиды Южного Урала (Горожанина, Кузьмин, 1987; Салихов и др., 1987); метабазиты (от девона до архея) Восточного Забайкалья (Гусев, Песков, 1996) и Восточной Сибири (Гаврикова, Гирнис, 1995); силурийские и докембрийские метабазиты Урала (Иванов, 1982; Старков, 1963); позднерифейские метабазиты Алданского щита (Алексеев, Каминский, 1971); протерозойские и архейские ортоамфиболиты, метабазальты и метадиабазы Русской платформы (Кременецкий, Овчинников, 1986; Танатар-Бараш, Дудник, 1977); докембрийские метабазиты и пироксен-амфиболовые сланцы Прибайкалья (Макрыгина и др., 1992, 2000; Макрыгина, Петрова, 1996); протерозойские и архейские метабазальты Восточного Саяна (Мехоношин, 1987); докембрийские амфиболиты Монтаны (Buttler, 1966); докембрийские зеленокаменные метабазиты Южной Африки (Смит и др., 1987); архейские метабазиты Квебека, Канада (Lidden et al., 1982).

**Zr, Hf, V, Cr, Co, Ni.** Используются в основном данные о горных породах, перечисленных ниже.

*Пески, песчаники, глины, глинистые сланцы, карбонатные породы:* кайнозойские и мезозойские пески, песчаники и глины Казахстана (Алексеев и др., 1983); мезозойские и кайнозойские пески, алевролиты, аргиллиты, глины Западно-Сибирской плиты (Шор и др., 1983); песчаники, глины, известняки Германии и отчасти Японии от современных до девонских (Дегенхардт, 1959); мезозойские песчаники, алевролиты, аргиллиты Западно-Сибирской плиты (Гавшин, Никитин, 1989; Гавшин и др., 1979, 1983); пермские аркозовые песчаники Колорадо и Юты (Van de Kamp, Leake, 1994); каменноугольные терригенные породы Тимано-Печорской провинции (Юдович и др., 1972); юрские известняки Таджикской депрессии (Пачаджанов, Адамчук, 1983); песчанистые породы, алевролиты и аргиллиты (от юры до архея) Центрального Казахстана (Глухан, Серых, 1999, 2000); пермские мергели Предуралья (Кетрис и др., 1972); нижнепалеозойские глинистые сланцы, доломиты, известняки Тянь-Шаня (Гавшин, Бахтуров, 1989); верхнерифейские доломиты и известняки Тимано-Печорской провинции (Герцен, 1972); терригенные породы венда Сибирской платформы (Никитин, Мельников, 1989).

*Кремнистые породы* Германии, Исландии, Йеллоустонского парка, Тянь-Шаня от современных до нижнепалеозойских (Дегенхардт, 1959; Гавшин, Бахтуров, 1989).

*Эвапориты:* гипсоносные и соленосные глины Германии (Дегенхардт, 1959); различные эвапориты, преимущественно кембрийские, Сибирской платформы (Гавшин, Никитин, 1989).

*Вулканиды:* четвертичные кислые лавы, липариты, дациты, андезиты, андезито-базальты, базальты Курильских островов и Камчатки (Горкун и др., 1963); палеогеновые липариты Сихоте-Алиня (Геохимическая модель..., 1984); кайнозойские эффузивы Кавказа (Карапетян, Меликсетян, 1981; Геохимия континентального..., 1987); кайнозойские и позднемеловые базальты Северо-Восточной Азии (Федоров, Филатова, 1999); мезозойские липариты Забайкалья (Лебедева, 1981); базальты Сибирской платформы (Нестеренко, Альмухамедов, 1973); триасовые базальты Восточного Забайкалья (Гусев, Песков, 1966); меловые базальтоиды Камчатки (Пузанков и др., 1989); мезозойско-пермские базальты Западной Сибири (Кременецкий, Гладких, 1997); липаритовые порфиры Зауралья (Иванов и др., 1980).

*Метапесчаники:* вендско-силурийские (включая яшмы) Южного Тянь-Шаня (Болотов, Иванов, 1980; Волкова и др., 1994); раннепротерозойские (включая квациты) Южной Африки (Wronkiewicz, Kondie, 1990); докембрийские Байкало-Патомского нагорья (Развозжаева и др., 1997), Русской платформы, Финской Лапландии (Болотов, Иванов, 1980; Кременецкий, Овчинников, 1986; Сахама, 1952; Мыскова и др., 2000); архейские Украинского щита (Белевцев и др., 1976).

*Парасланцы и парагнейсы:* вендско-силурийские метапелиты Южного Тянь-Шаня (Волкова и др., 1994); докембрийские метапелиты Байкало-Патомского нагорья (Развозжаева и др., 1997); докембрийские парагнейсы Монтаны (Buttler, 1966); парагнейсы Шварцвальда (Дегенхардт, 1959); ран-

непротерозойские метапелиты Южной Африки (Wronkiewicz, Kondie, 1990); протерозойские и архейские слюдяные сланцы и филлиты Дальнего Востока (Геохимическая модель..., 1984); докембрийские метапелиты Северной Америки (Gromet et al., 1984); докембрийские парагнейсы и парасланцы Восточной Сибири, Украинского щита, Русской платформы, Лапландского пояса (Литология..., 1974; Макрыгина, Петров, 1975; Белевцев и др., 1976; Болотов, Иванов, 1980; Лебедев, Нагайцев, 1980; Геохимия магматизма..., 1982; Кременецкий, Овчинников, 1986; Литология..., 1974); архейские парасланцы Восточного Лабрадора (Коллерсон и др., 1980).

*Карбонатные метаморфические породы:* мраморы Южного Урала (Сначев, Рачев, 1991); докембрийские мраморы Ханкайского массива в Приморье (Геохимическая модель..., 1984); докембрийские кальцитовые и доломитовые мраморы и кальцифиры Прибайкалья (Петрова, Левицкий, 1984); докембрийские карбонатные породы Русской платформы (Кременецкий, Овчинников, 1986) и Южной Финской Лапландии (Сахама, 1952).

*Железистые породы:* железистые кварциты Казахстана (Ситько и др., 1971) и Украинского щита (Тарханов, 1969).

*Гранито-гнейсы:* ортогнейсы из Шварцвальда (Дегенхардт, 1959); протерозойские и архейские гнейсы и сланцы Дальнего Востока (Геохимическая модель..., 1984); гнейсы и мигматиты Прибайкалья (Макрыгина, Петрова, 1996), Украинского щита (Белевцев и др., 1976), Курской магнитной аномалии и Мугоджар (Миловский и др., 1985), Русской платформы (Резников, Ишевская, 1972; Кременецкий, Овчинников, 1986; Лебедев, Нагайцев, 1980; Мыскова и др., 2000), Лабрадора (Коллерсон и др., 1980), Монтаны (Buttler, 1966), Южной Финской Лапландии (Сахама, 1952), Гренландии (Ламберт, Холланд, 1980; Тарни, 1980); чарнокитовые гнейсы Южной Норвегии (Cooper, Field, 1981).

*Метариолиты:* палеозойские зеленокаменные кислые метавулкани-ты Урала (Иванов и др., 1980); протерозойские метариолиты Восточного Саяна (Мехоношин, 1987); кислые метавулкани-ты Восточного Лабрадо-ра (Коллерсон и др., 1980); метариолиты и метадациты Балтийского щита (Минц, Цюнь, 1997; Кременецкий, Овчинников, 1986; Мыскова и др., 2000); архейские кислые метавулкани-ты районов Онтарио и Квебека (Goodwin, 1979).

*Метаандезиты:* палеозойские и докембрийские Урала (Мельникова, 1981); архейские (включая метадациты) Кольского полуострова (Боло-тов, Иванов, 1980; Кременецкий, Овчинников, 1986; Минц, Цюнь, 1997; Мыскова и др., 2000), Онтарио и Квебека в Канаде (Goodwin, 1979; Lidden et al., 1982).

*Метабазиты:* палеозойские метабазиты Урала (Старков, 1963; Ива-нов, 1982; Горожанина, Кузьмин, 1987; Салихов и др., 1987); нижнепалео-зойские и архейские Восточного Забайкалья (Гусев, Песков, 1996) и Вос-точной Сибири (Гаврикова, Гирнис, 1995); ордовикские (включая амфи-болиты) комплекса баллантрей (Wilkinson, Cann, 1974); ордовикские зе-леные сланцы Норвегии (Grenne, Roberts, 1980); позднерифейские Алдан-ского щита (Алексеев, Каминский, 1971); протерозойские и архейские

ортоамфиболиты, метабазальты и метадиабазы Русской платформы (Кременецкий, Овчинников, 1986); метабазиты и амфиболиты Гренландии (Риваленти, 1980); докембрийские метабазиты и пироксен-амфиболовые сланцы Прибайкалья (Макрыгина и др., 1992; Макрыгина, Петрова, 1996); протерозойские и архейские метабазальты Восточного Саяна (Мехоношин, 1987); докембрийские амфиболиты Монтаны (Buttler, 1966); докембрийские зеленокаменные метабазиты Южной Африки (Смит и др., 1987); архейские амфиболиты и прочие метабазиты Украинского щита (Тарханов, 1969; Белевцев и др., 1976), Онтарио и Квебека в Канаде (Goodwin, 1979; Ludden et al., 1982); архейские амфиболиты Лабрадора (Коллерсон, 1980).

**Nb, Ta, Mo, W.** За основу приняты: для Nb и Ta – данные Е.С. Кабановой с коллегами (1982), для Mo и W (Геохимия молибдена..., 1971; Иванов, 1997). Поправки и дополнения введены по результатам расчетов на основании данных, имеющихся в описаниях некоторых горных пород из числа отмеченных выше. Эвапориты – по Т.Ф. Бойко (1973).

**Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt.** В основу положены данные из обобщений Л.Н. Овчинникова (1990) и В.В. Иванова (1997). Поправки и дополнения введены по результатам анализов горных пород: мезозойских и палеозойских песчаников и горючего сланца Таджикистана (Пачаджанов, 1985); базальтов эффузивной фации траппов Таймыро-Норильского района (Платинометаллы..., 1994; Додин Д.А., 1999); верхнедевонских и карбоновых базальтов Магнитогорского мегасинклинория на Южном Урале (Салихов, 1987); докембрийских метапесчаников и кристаллических сланцев Балтийского щита (Хвостова и др., 1975); силурийских и девонских метабазальтов Магнитогорского мегасинклинория на Южном Урале (Салихов, 1987); докембрийских метабазитов (включая ортоамфиболиты) Балтийского щита (Хвостова и др., 1975; Рыбаков и др., 1995; Гроховская и др., 1999).

В 2003–2008 гг. некоторые полученные ранее цифры уточнялись по мере появления новых публикаций. Первоисточники дополнительных материалов даны в последующих главах при характеристике конкретных химических элементов.

### 1.1.2. Обсуждение полученных данных

Результаты расчетов приведены в табл. 1.1–1.7. Часть новых цифр средних содержаний химических элементов в горных породах отличаются от опубликованных ранее (Григорьев, 2002, 2003), но это мало повлияло на значения средних содержаний химических элементов в верхней части континентальной коры. Полученные данные о среднем содержании химических элементов в горных породах осадочного и гранитно-гнейсового слоев подробнее, чем имеющихся в литературе. Часть их определена впервые, часть близка к литературным данным, часть отличалась от последних. Предлагаемый вариант среднего химического состава верхней части континентальной коры почти соответствует второму варианту континентальной коры по И.А. Резанову (2002). От других опубликованных принятый вари-

Таблица 1.1

**Среднее содержание химических элементов (%) в горных породах верхней части континентальной коры.  
Водород, щелочные и щелочноземельные металлы марганец, железо, кобальт, никель**

| Слой, горные породы                                                             | H       | Li                   | Na        | K         | Rb           | Cs              | Be              | Mg        | Ca        | Sr           | Ba                 | Mn          | Fe        | Co                 | Ni           |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------|-----------|-----------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|--------------|--------------------|-------------|-----------|--------------------|--------------|
| Пески и песчаники                                                               | 0.28    | 0.0029               | 1.39      | 1.76      | 0.0064       | 0.00084         | 0.00017         | 1.12      | 2.83      | 0.022        | 0.037              | 0.059       | 3.21      | 0.0013             | 0.0035       |
| Глины, глинистые сланцы                                                         | 0.44    | 0.0054               | 1.02      | 2.73      | 0.0133       | 0.0013          | 0.0003          | 1.65      | 2.21      | 0.024        | 0.046              | 0.08        | 4.71      | 0.0019             | 0.0049       |
| Карбонатные породы                                                              | 0.083   | 0.0018               | 0.22      | 0.46      | 0.0026       | 0.00028         | 0.00003         | 3.45      | 27.43     | 0.038        | 0.036              | 0.077       | 1.09      | 0.0051             | 0.0019       |
| Кремнистые породы                                                               | 0.16    | 0.0004               | 0.33      | 0.91      | 0.0052       | 0.00038         | 0.00013         | 0.56      | 1.01      | 0.011        | 0.03               | 0.11        | 3.19      | 0.00013            | 0.0037       |
| Эвапориты                                                                       | 0.18    | 0.0008               | 28.64     | 0.22      | 0.0034       | 0.00012         | 0.00007         | 0.24      | 7.09      | 0.096        | 0.042              | 0.0008      | 0.029     | He опр.            | He опр.      |
| Осадочные породы в целом                                                        | 0.322   | 0.0039               | 1.31      | 1.98      | 0.0092       | 0.00095         | 0.00021         | 1.83      | 7.28      | 0.027        | 0.041              | 0.073       | 3.54      | 0.0014             | 0.0038       |
| Кислые вулканиды                                                                | 0.079   | 0.0027               | 2.58      | 3.65      | 0.0135       | 0.0015          | 0.00032         | 0.22      | 0.79      | 0.024        | 0.048              | 0.059       | 1.5       | 0.00048            | 0.0008       |
| Средние вулканиды                                                               | 0.088   | 0.0021               | 2.72      | 1.49      | 0.0062       | 0.00067         | 0.00014         | 0.85      | 4.44      | 0.039        | 0.041              | 0.11        | 5.04      | 0.0019             | 0.0051       |
| Основные вулканиды                                                              | 0.09    | 0.0019               | 1.94      | 0.77      | 0.0028       | 0.00028         | 0.00013         | 3.92      | 7.2       | 0.044        | 0.039              | 0.14        | 8.06      | 0.003              | 0.0073       |
| Вулканиды в целом                                                               | 0.088   | 0.0021               | 2.26      | 1.34      | 0.0051       | 0.00054         | 0.00016         | 2.84      | 5.59      | 0.04         | 0.041              | 0.12        | 6.35      | 0.0024             | 0.0058       |
| Осадочный слой                                                                  | 0.286   | 0.0036               | 1.46      | 1.88      | 0.0086       | 0.00089         | 0.0002          | 1.98      | 7.02      | 0.029        | 0.041              | 0.081       | 3.98      | 0.0016             | 0.0042       |
| Граниты                                                                         | 0.058   | 0.0034               | 2.69      | 3.58      | 0.0205       | 0.00073         | 0.00045         | 0.33      | 1.11      | 0.015        | 0.075              | 0.042       | 1.83      | 0.0001             | 0.00035      |
| Гранодиориты                                                                    | 0.09    | 0.0023               | 2.74      | 2.52      | 0.009        | 0.00036         | 0.00018         | 1.1       | 2.4       | 0.044        | 0.056              | 0.075       | 3.3       | 8·10 <sup>-4</sup> | 0.0016       |
| Базиты                                                                          | 0.16    | 0.0015               | 1.93      | 0.69      | 0.0029       | 0.00025         | 0.0001          | 4.3       | 6.29      | 0.046        | 0.029              | 0.14        | 8.25      | 0.0048             | 0.014        |
| Сyenиты                                                                         | 0.063   | 0.0022               | 3.59      | 5.78      | 0.0174       | 0.0007          | 0.00041         | 1.06      | 2.7       | 0.02         | 0.16               | 0.12        | 3.31      | 0.0003             | 0.0004       |
| Ультрабазиты                                                                    | 0.33    | 1.2·10 <sup>-4</sup> | 0.59      | 0.29      | 0.0004       | 0.00001         | 0.00002         | 14.56     | 3.99      | 0.0007       | 8·10 <sup>-5</sup> | 0.15        | 10.4      | 0.015              | 0.2          |
| Магматические породы                                                            | 0.079   | 0.0029               | 2.61      | 2.98      | 0.0154       | 0.00058         | 0.00034         | 1.04      | 2.05      | 0.026        | 0.065              | 0.062       | 2.97      | 0.00087            | 0.003        |
| Металесаники                                                                    | 0.14    | 0.0026               | 1.55      | 1.97      | 0.0057       | 0.0002          | 0.00016         | 1.33      | 1.77      | 0.013        | 0.038              | 0.086       | 3.47      | 0.0016             | 0.0046       |
| Парагнейсы, сланцы                                                              | 0.16    | 0.0038               | 2.00      | 2.07      | 0.0105       | 0.00039         | 0.00026         | 1.8       | 2.72      | 0.026        | 0.044              | 0.098       | 4.41      | 0.0019             | 0.0078       |
| Карбонатные породы                                                              | 0.15    | 0.0015               | 0.19      | 0.34      | 0.0026       | 0.0002          | 0.00008         | 8.09      | 22.62     | 0.058        | 0.036              | 0.13        | 1.56      | 0.00069            | 0.0012       |
| Железистые породы                                                               | 0.09    | 0.0002               | 0.96      | 0.41      | 0.0015       | 0.00003         | 0.00006         | 1.81      | 2.11      | 0.016        | 0.028              | 0.076       | 24.14     | 0.0005             | 0.0018       |
| Параметаморфиты                                                                 | 0.157   | 0.0036               | 1.89      | 1.99      | 0.0098       | 0.00036         | 0.00024         | 1.96      | 3.28      | 0.026        | 0.043              | 0.098       | 4.45      | 0.0018             | 0.0073       |
| Гранито-гнейсы                                                                  | 0.11    | 0.0030               | 2.62      | 2.8       | 0.009        | 0.0005          | 0.00018         | 1.34      | 2.34      | 0.025        | 0.07               | 0.04        | 3.55      | 0.0017             | 0.0023       |
| Метариолиты                                                                     | 0.15    | 0.0026*              | 2.93      | 1.55      | 0.013*       | 0.0007*         | 0.0003          | 0.73      | 1.53      | 0.02         | 0.069              | 0.059       | 3.02      | 0.0009             | 0.0027       |
| Метаандезиты                                                                    | 0.19    | 0.0026               | 2.96      | 1.14      | 0.006*       | 0.0004*         | 0.00027         | 2.17      | 3.72      | 0.031        | 0.024              | 0.11        | 5.38      | 0.0017             | 0.004        |
| Метабазиты                                                                      | 0.17    | 0.002                | 1.83      | 0.7       | 0.0019       | 0.00034         | 0.00015         | 4.28      | 6.66      | 0.04         | 0.02               | 0.13        | 8.08      | 0.0049             | 0.013        |
| Ортометаморфиты                                                                 | 0.12    | 0.0029               | 2.55      | 2.46      | 0.0081       | 0.00048         | 0.00018         | 1.7       | 2.88      | 0.027        | 0.062              | 0.054       | 4.13      | 0.0021             | 0.0036       |
| Гранитно-гнейсовый слой                                                         | 0.13    | 0.0032               | 2.26      | 2.33      | 0.0101       | 0.00044         | 0.00024         | 1.71      | 2.92      | 0.026        | 0.054              | 0.075       | 4.08      | 0.0017             | 0.0052       |
| Верхняя часть континентальной коры                                              | 0.167   | 0.0033               | 2.07      | 2.23      | 0.0098       | 0.00055         | 0.00023         | 1.77      | 3.89      | 0.027        | 0.051              | 0.077       | 4.06      | 0.0017             | 0.005        |
| Upper continental crust. Литературные данные 1967–2004 гг. (Rudnick, Gao, 2004) | He опр. | 0.002–0.0022         | 2.09–2.89 | 2.22–2.81 | 0.0082–0.011 | 0.00035–0.00073 | 0.00013–0.00031 | 1.27–1.82 | 2.43–3.03 | 0.0266–0.038 | 0.055–0.107        | 0.054–0.077 | 3.18–4.49 | 0.0012–0.0018      | 0.0019–0.006 |

\* Предполагаемое значение.

**Среднее содержание химических элементов (%) в горных породах верхней части континентальной коры.  
Подгруппы бора и углерода**

| Горные породы, слои                                                             | B              | Al       | Ga                 | In                                       | Tl                                        | C      | Si          | Ge                                         | Sn                                         | Pb                   |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------|--------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|--------|-------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|
| Пески и песчаники                                                               | 0.0026         | 5.99     | 0.001              | 3·10 <sup>-6*</sup>                      | 8·10 <sup>-5</sup>                        | 0.93   | 31.42       | 1.1·10 <sup>-4</sup>                       | 2.8·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0014               |
| Глины, глинистые сланцы                                                         | 0.011          | 8.89     | 0.0016             | 6.3·10 <sup>-6</sup>                     | 1.3·10 <sup>-4</sup>                      | 1.4    | 26.88       | 2·10 <sup>-4</sup>                         | 3.5·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0014               |
| Карбонатные породы                                                              | 0.0037         | 1.19     | 0.0005             | 9·10 <sup>-7</sup>                       | 6·10 <sup>-6</sup>                        | 9.79   | 5.92        | 3.6·10 <sup>-5</sup>                       | 0.8·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0007               |
| Кремнистые породы                                                               | 0.001          | 2.48     | 0.0002             | 1·10 <sup>-6</sup>                       | He опр.                                   | 0.88   | 38.32       | He опр.                                    | 1.4·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0006               |
| Эвалориты                                                                       | 0.0038         | 0.04     | 0.0008             | 4·10 <sup>-6</sup>                       | He опр.                                   | 0.18   | 0.18        | 5·10 <sup>-5</sup>                         | He опр.                                    | He опр.              |
| Осадочные породы в целом                                                        | 0.0072         | 6.44     | 0.0012             | 4.3·10 <sup>-6</sup>                     | 8.9·10 <sup>-5</sup>                      | 2.87   | 23.84       | 1.4·10 <sup>-4</sup>                       | 2.7·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0012               |
| Кислые вулканиды                                                                | 0.0029         | 6.99     | 0.0026             | 5.6·10 <sup>-6</sup>                     | 2.1·10 <sup>-4</sup>                      | 0.19   | 33.99       | 1·10 <sup>-4</sup>                         | 3.5·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0023               |
| Средние вулканиды                                                               | 0.0038         | 8.83     | 0.0029             | 4·10 <sup>-6*</sup>                      | He опр.                                   | 0.13   | 27.44       | 1.5·10 <sup>-4</sup>                       | 2.9·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0018               |
| Основные вулканиды                                                              | 0.0009         | 8.66     | 0.0026             | 6.7·10 <sup>-6</sup>                     | He опр.                                   | 0.18   | 22.9        | 1.5·10 <sup>-4</sup>                       | 2.5·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0011               |
| Вулканиды в целом                                                               | 0.002          | 8.51     | 0.0027             | 5.7·10 <sup>-6</sup>                     | 7·10 <sup>-5*</sup>                       | 0.17   | 25.62       | 1.4·10 <sup>-4</sup>                       | 2.7·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0015               |
| Осадочный слой                                                                  | 0.0064         | 6.77     | 0.0014             | 4.5·10 <sup>-6</sup>                     | 8.6·10 <sup>-5</sup>                      | 2.45   | 24.12       | 1.4·10 <sup>-4</sup>                       | 2.7·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0012               |
| Граниты                                                                         | 0.0013         | 7.36     | 0.0018             | 2.2·10 <sup>-5</sup>                     | 1.9·10 <sup>-4</sup>                      | 0.03   | 33.83       | 2.8·10 <sup>-4</sup>                       | 3·10 <sup>-4</sup>                         | 0.0019               |
| Гранодиориты                                                                    | 0.0012         | 8.6      | 0.0018             | 1.7·10 <sup>-5</sup>                     | 8.6·10 <sup>-5</sup>                      | 0.02   | 30.5        | 1.3·10 <sup>-4</sup>                       | 2.2·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0015               |
| Базиты                                                                          | 0.0005         | 7.94     | 0.0016             | 2·10 <sup>-5</sup>                       | 1.8·10 <sup>-5</sup>                      | 0.033  | 23.54       | 1.4·10 <sup>-4</sup>                       | 2.7·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0006               |
| Сиеиты                                                                          | 0.0009         | 9.84     | 3·10 <sup>-5</sup> | 1·10 <sup>-5</sup>                       | 1.4·10 <sup>-4</sup>                      | 0.011  | 26.83       | 1·10 <sup>-4</sup>                         | 4·10 <sup>-4</sup>                         | 0.0012               |
| Ультрабазиты                                                                    | 0.0003         | 3.03     | 0.0002             | 1·10 <sup>-6</sup>                       | 1.5·10 <sup>-5</sup>                      | 0.041  | 20.69       | 1.3·10 <sup>-4</sup>                       | 5·10 <sup>-5</sup>                         | 4.6·10 <sup>-5</sup> |
| Магматические породы                                                            | 0.0012         | 7.74     | 0.0018             | 2·10 <sup>-5</sup>                       | 1.4·10 <sup>-4</sup>                      | 0.028  | 31.73       | 2.2·10 <sup>-4</sup>                       | 2.8·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0016               |
| Метапесчаники                                                                   | 0.0017         | 5.33     | 0.0009             | He опр.                                  | 4.4·10 <sup>-5</sup>                      | 0.34   | 33.84       | 8·10 <sup>-5</sup>                         | 4.4·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0018               |
| Парагнейсы, сланцы                                                              | 0.0036         | 8.13     | 0.0018             | He опр.                                  | 6.3·10 <sup>-5</sup>                      | 0.35   | 29.42       | 1.5·10 <sup>-4</sup>                       | 4.6·10 <sup>-4</sup>                       | 0.002                |
| Карбонатные породы                                                              | 0.0017         | 0.96     | 0.0006             | He опр.                                  | He опр.                                   | 8.86   | 7.35        | 3.9·10 <sup>-5</sup>                       | 4.1·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0013               |
| Железистые породы                                                               | 0.007          | 3.02     | 0.0002             | He опр.                                  | He опр.                                   | 0.25   | 23.73       | 2.5·10 <sup>-4</sup>                       | 4.5·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0027               |
| Параметаморфиты                                                                 | 0.0034         | 7.61     | 0.0017             | 2·10 <sup>-5*</sup>                      | 6·10 <sup>-5</sup>                        | 0.62   | 29.01       | 1.4·10 <sup>-4</sup>                       | 4.6·10 <sup>-4</sup>                       | 0.002                |
| Гранито-гнейсы                                                                  | 0.002          | 8.37     | 0.0027             | 3.2·10 <sup>-5</sup>                     | 6.9·10 <sup>-5</sup>                      | 0.019  | 30.12       | 5·10 <sup>-5</sup>                         | 3.3·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0019               |
| Метариолиты                                                                     | 0.0024         | 7.28     | 0.0023             | He опр.                                  | He опр.                                   | 0.087  | 32.83       | 5·10 <sup>-5</sup>                         | 5.3·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0031               |
| Метандезиты                                                                     | 0.0016         | 8.35     | 0.002              | He опр.                                  | 5·10 <sup>-5*</sup>                       | 0.2    | 27.41       | 5·10 <sup>-5</sup>                         | 1.9·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0012               |
| Метабазиты                                                                      | 0.0013         | 7.48     | 0.002              | 1.1·10 <sup>-5</sup>                     | 2·10 <sup>-5*</sup>                       | 0.076  | 24.19       | 9·10 <sup>-5</sup>                         | 3·10 <sup>-4</sup>                         | 0.0009               |
| Ортометаморфиты                                                                 | 0.0019         | 8.24     | 0.0026             | 2.8·10 <sup>-5</sup>                     | 1·10 <sup>-5*</sup>                       | 0.034  | 29.39       | 5.5·10 <sup>-5</sup>                       | 3.3·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0018               |
| Гранитно-гнейсовый слой                                                         | 0.0025         | 7.87     | 0.002              | 2.3·10 <sup>-5</sup>                     | 7·10 <sup>-5</sup>                        | 0.3    | 29.62       | 1.2·10 <sup>-4</sup>                       | 3.8·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0019               |
| Верхняя часть континентальной коры                                              | 0.0034         | 7.61     | 0.0019             | 1.9·10 <sup>-5</sup>                     | 7.7·10 <sup>-5</sup>                      | 0.81   | 28.32       | 1.3·10 <sup>-4</sup>                       | 3.5·10 <sup>-4</sup>                       | 0.0017               |
| Upper continental crust. Литературные данные 1967–2004 гг. (Rudnick, Gao, 2004) | 0.00092–0.0028 | 7.5–8.52 | 0.0014–0.0018      | 5·10 <sup>-6</sup> –6.1·10 <sup>-6</sup> | 5·10 <sup>-5</sup> –1.55·10 <sup>-4</sup> | 0.32** | 30.26–31.74 | 1.3·10 <sup>-4</sup> –1.6·10 <sup>-4</sup> | 1.7·10 <sup>-4</sup> –5.5·10 <sup>-4</sup> | 0.0017–0.0018        |

\* Здесь и в последующих таблицах предполагаемые величины; \*\* по (Wedepohl, 1995).



Таблица 1.3

## Среднее содержание химических элементов (%) в горных породах . Подгруппы азота, кислорода, фтора

| Горные породы, слои                                                             | N            | P                  | As                                         | Sb                                       | Bi                                         | O       | S           | Se                                       | Te                    | F          | Cl         | Br                   | I                    |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|-------------|------------------------------------------|-----------------------|------------|------------|----------------------|----------------------|
| Пески и песчаники                                                               | 0.012        | 0.062              | 7.2·10 <sup>-4</sup>                       | 6.3·10 <sup>-5*</sup>                    | 2.10 <sup>-5</sup>                         | 49.8    | 0.19        | 1.10 <sup>-5</sup>                       | He опр.               | 0.033      | 0.059      | 0.0048               | 1.10 <sup>-4</sup>   |
| Глины. Сланцы                                                                   | 0.058        | 0.079              | 9.3·10 <sup>-4</sup>                       | 1.3·10 <sup>-4</sup>                     | 3.8·10 <sup>-5</sup>                       | 48.46   | 0.36        | 3.6·10 <sup>-5</sup>                     | 1.10 <sup>-6*</sup>   | 0.061      | 0.085      | 0.0057               | 1.2·10 <sup>-4</sup> |
| Карбонатные породы                                                              | 0.039        | 0.048              | 4.4·10 <sup>-4</sup>                       | 2.5·10 <sup>-5</sup>                     | 5.10 <sup>-6</sup>                         | 49.12   | 0.25        | 2.7·10 <sup>-5</sup>                     | He опр.               | 0.033      | 0.053      | 0.00058              | 1.1·10 <sup>-4</sup> |
| Кремнистые породы                                                               | 0.04*        | 0.066              | 4.4·10 <sup>-4</sup>                       | He опр.                                  | He опр.                                    | 51.07   | 0.19        | He опр.                                  | He опр.               | He опр.    | He опр.    | He опр.              | He опр.              |
| Эвапориты                                                                       | 0.06*        | 4.10 <sup>-4</sup> | 4.10 <sup>-4</sup>                         | He опр.                                  | 3.10 <sup>-6</sup>                         | 13.15   | 5.34        | 4.10 <sup>-7</sup>                       | He опр.               | 0.024      | 44.21      | 0.03                 | 4.8·10 <sup>-5</sup> |
| Осадочные породы в целом                                                        | 0.042        | 0.067              | 7.7·10 <sup>-4</sup>                       | 8.9·10 <sup>-5</sup>                     | 2.6·10 <sup>-5</sup>                       | 48.51   | 0.36        | 2.7·10 <sup>-5</sup>                     | 1.10 <sup>-6*</sup>   | 0.047      | 0.65       | 0.0047               | 1.1·10 <sup>-4</sup> |
| Кислые вулканы                                                                  | 0.003*       | 0.044              | 4.3·10 <sup>-4</sup>                       | 5.10 <sup>-5*</sup>                      | 1.4·10 <sup>-5</sup>                       | 49.13   | 0.058       | 9.3·10 <sup>-6</sup>                     | 1.8·10 <sup>-7</sup>  | 0.051      | 0.018      | 2.10 <sup>-4</sup>   | 2.10 <sup>-5</sup>   |
| Средние вулканы                                                                 | 0.0032       | 0.096              | 2.5·10 <sup>-4</sup>                       | 7.10 <sup>-5</sup>                       | 7.10 <sup>-6</sup>                         | 46.71   | 0.071       | 6.3·10 <sup>-6</sup>                     | 4.1·10 <sup>-7</sup>  | 0.05       | 0.025      | 3.10 <sup>-4</sup>   | 3.10 <sup>-5*</sup>  |
| Основные вулканы                                                                | 0.0036       | 0.109              | 2.10 <sup>-4</sup>                         | 1.1·10 <sup>-4</sup>                     | 5.10 <sup>-6</sup>                         | 44.78   | 0.071       | 1.1·10 <sup>-5</sup>                     | 2.3·10 <sup>-7</sup>  | 0.046      | 0.033      | 0.00041              | 6.10 <sup>-5</sup>   |
| Вулканы в целом                                                                 | 0.0034       | 0.097              | 2.4·10 <sup>-4</sup>                       | 9.1·10 <sup>-5</sup>                     | 6.7·10 <sup>-6</sup>                       | 45.89   | 0.069       | 9.4·10 <sup>-6</sup>                     | 2.8·10 <sup>-7</sup>  | 0.048      | 0.029      | 3.5·10 <sup>-4</sup> | 5.10 <sup>-5*</sup>  |
| Осадочный слой                                                                  | 0.036        | 0.072              | 6.8·10 <sup>-4</sup>                       | 8.9·10 <sup>-5</sup>                     | 2.3·10 <sup>-5</sup>                       | 48.10   | 0.31        | 2.4·10 <sup>-5</sup>                     | 8.9·10 <sup>-7</sup>  | 0.047      | 0.55       | 0.004                | 1.10 <sup>-4</sup>   |
| Граниты                                                                         | 0.0022       | 0.06               | 1.6·10 <sup>-4</sup>                       | 3.10 <sup>-5</sup>                       | 2.10 <sup>-5</sup>                         | 48.46   | 0.03        | 7.10 <sup>-6</sup>                       | 1.10 <sup>-7</sup>    | 0.082      | 0.019      | 0.00017              | 8.10 <sup>-5</sup>   |
| Гранодиориты                                                                    | 0.002        | 0.11               | 1.8·10 <sup>-4</sup>                       | 5.10 <sup>-5</sup>                       | 1.1·10 <sup>-5</sup>                       | 47.9    | 0.03        | 8.10 <sup>-6</sup>                       | 1.6·10 <sup>-7</sup>  | 0.056      | 0.016      | 0.00043              | 5.10 <sup>-5</sup>   |
| Базиты                                                                          | 0.0019       | 0.089              | 2.10 <sup>-4</sup>                         | 1.1·10 <sup>-4</sup>                     | 5.2·10 <sup>-6</sup>                       | 44.39   | 0.1         | 7.10 <sup>-6</sup>                       | 3.5·10 <sup>-7</sup>  | 0.04       | 0.02       | 0.00035              | 5.10 <sup>-5</sup>   |
| Сyenиты                                                                         | 0.003        | 0.087              | 1.4·10 <sup>-4</sup>                       | 2.2·10 <sup>-5</sup>                     | 1.8·10 <sup>-5</sup>                       | 45.73   | 0.03        | 5.10 <sup>-6</sup>                       | 3.4·10 <sup>-7</sup>  | 0.12       | 0.047      | 0.00027              | 7.10 <sup>-5</sup>   |
| Ультрабазиты                                                                    | 0.0007       | 0.035              | 1.3·10 <sup>-4</sup>                       | 9.10 <sup>-5</sup>                       | 9.10 <sup>-7</sup>                         | 44.89   | 0.088       | 5.10 <sup>-6</sup>                       | 1.10 <sup>-7</sup>    | 0.01       | 0.0074     | 9.10 <sup>-5</sup>   | 3.10 <sup>-5</sup>   |
| Магматиты в целом                                                               | 0.0021       | 0.076              | 1.7·10 <sup>-4</sup>                       | 4.4·10 <sup>-5</sup>                     | 1.6·10 <sup>-5</sup>                       | 47.83   | 0.038       | 7.2·10 <sup>-6</sup>                     | 1.4·10 <sup>-7</sup>  | 0.07       | 0.018      | 0.00026              | 6.9·10 <sup>-5</sup> |
| Металесчаники                                                                   | 0.02*        | 0.057              | 7.6·10 <sup>-4</sup>                       | 7.10 <sup>-5*</sup>                      | 3.1·10 <sup>-5</sup>                       | 49.27   | 0.053       | 1.10 <sup>-5</sup>                       | He опр.               | 0.03       | 0.025      | 1.10 <sup>-4</sup>   | 5.10 <sup>-5</sup>   |
| Парагнейсы, сланцы                                                              | 0.02*        | 0.054              | 9.5·10 <sup>-4</sup>                       | 1.3·10 <sup>-4</sup>                     | 5.8·10 <sup>-5</sup>                       | 47.8    | 0.1         | 2.10 <sup>-5</sup>                       | He опр.               | 0.065      | 0.022      | 0.0002               | 2.10 <sup>-5</sup>   |
| Карбонатные породы                                                              | 0.02*        | 0.13               | 4.10 <sup>-4*</sup>                        | 2.5·10 <sup>-5*</sup>                    | 1.3·10 <sup>-5</sup>                       | 48.84   | 0.228       | He опр.                                  | He опр.               | 0.047      | 0.03       | He опр.              | 3.10 <sup>-5</sup>   |
| Железистые породы                                                               | 0.02*        | 0.047              | 7.5·10 <sup>-4</sup>                       | He опр.                                  | He опр.                                    | 42.69   | 0.076       | He опр.                                  | He опр.               | 0.016      | 0.045      | He опр.              | He опр.              |
| Параметаморфиты                                                                 | 0.02*        | 0.057              | 9.2·10 <sup>-4</sup>                       | 1.2·10 <sup>-4</sup>                     | 5.4·10 <sup>-5</sup>                       | 47.9    | 0.1         | 1.8·10 <sup>-5</sup>                     | 1.10 <sup>-7*</sup>   | 0.061      | 0.023      | 2.10 <sup>-4*</sup>  | 2.3·10 <sup>-5</sup> |
| Гранито-гнейсы                                                                  | 0.0037       | 0.087              | 1.4·10 <sup>-4</sup>                       | 3.3·10 <sup>-5</sup>                     | 1.10 <sup>-5</sup>                         | 47.97   | 0.106       | 7.10 <sup>-6*</sup>                      | He опр.               | 0.029      | 0.021      | 2.10 <sup>-4*</sup>  | 3.10 <sup>-5</sup>   |
| Метариолиты                                                                     | 0.003*       | 0.048              | 4.10 <sup>-4*</sup>                        | 5.10 <sup>-5</sup>                       | 1.5·10 <sup>-5</sup>                       | 49.15   | 0.036       | 9.1·10 <sup>-6*</sup>                    | He опр.               | 0.05       | 0.01       | 2.10 <sup>-4*</sup>  | 3.10 <sup>-5*</sup>  |
| Метаандезиты                                                                    | 0.003*       | 0.074              | 7.10 <sup>-4</sup>                         | 7.10 <sup>-5*</sup>                      | 1.5·10 <sup>-5</sup>                       | 47.41   | 0.03        | He опр.                                  | He опр.               | 0.058      | 0.01       | 2.10 <sup>-4*</sup>  | 3.10 <sup>-5*</sup>  |
| Метабазиты                                                                      | 0.003*       | 0.011              | 3.3·10 <sup>-4</sup>                       | 1.10 <sup>-4*</sup>                      | 2.10 <sup>-6</sup>                         | 45.11   | 0.1         | 1.1·10 <sup>-5*</sup>                    | 5.10 <sup>-7</sup>    | 0.053      | 0.03       | 2.10 <sup>-4*</sup>  | 3.10 <sup>-5*</sup>  |
| Ортометаморфиты                                                                 | 0.003*       | 0.076              | 1.9·10 <sup>-4</sup>                       | 4.3·10 <sup>-5</sup>                     | 9.4·10 <sup>-6*</sup>                      | 47.64   | 0.1         | 7.3·10 <sup>-6*</sup>                    | 1.10 <sup>-7*</sup>   | 0.033      | 0.021      | 2.10 <sup>-4*</sup>  | 3.10 <sup>-5*</sup>  |
| Гранитно-гнейсовый слой                                                         | 0.0026       | 0.067              | 5.2·10 <sup>-4</sup>                       | 7.8·10 <sup>-5</sup>                     | 3.1·10 <sup>-5</sup>                       | 47.8    | 0.09        | 1.3·10 <sup>-5</sup>                     | 1.10 <sup>-7*</sup>   | 0.053      | 0.022      | 2.10 <sup>-4*</sup>  | 3.3·10 <sup>-5</sup> |
| Верхняя часть континентальной коры                                              | 0.0106       | 0.069              | 5.6·10 <sup>-4</sup>                       | 8.1·10 <sup>-5</sup>                     | 2.9·10 <sup>-5</sup>                       | 47.87   | 0.14        | 1.5·10 <sup>-5</sup>                     | 2.9·10 <sup>-7*</sup> | 0.051      | 0.15       | 0.0011               | 4.9·10 <sup>-5</sup> |
| Upper continental crust. Литературные данные 1967–2004 гг. (Rudnick, Gao, 2004) | 0.008–0.0083 | 0.052–0.087        | 1.5·10 <sup>-4</sup> –4.8·10 <sup>-4</sup> | 3.10 <sup>-5</sup> –4.5·10 <sup>-5</sup> | 1.2·10 <sup>-5</sup> –2.3·10 <sup>-5</sup> | He опр. | 0.031–0.095 | 1.5·10 <sup>-5</sup> –9.10 <sup>-6</sup> | He опр.               | 0.05–0.061 | 0.01–0.064 | 1.6·10 <sup>-4</sup> | 1.4·10 <sup>-4</sup> |

Таблица 1.4

**Среднее содержание химических элементов ( $n \cdot 10^{-4} \%$ ) в горных породах верхней части континентальной коры.  
Подгруппы меди и цинка, скандий, иттрий, легкие лантаноиды**

| Горные породы, слои                                                             | Cu      | Ag         | Au            | Zn      | Cd        | Hg          | Sc      | Y       | La      | Ce        | Pr      | Nd        |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------|------------|---------------|---------|-----------|-------------|---------|---------|---------|-----------|---------|-----------|
| Пески и песчаники                                                               | 31      | 0.074      | 0.0031        | 67      | 0.74      | 0.049       | 5.6     | 29      | 20      | 39        | 4.3     | 16        |
| Глины, глинистые сланцы                                                         | 36      | 0.15       | 0.0046        | 89      | 0.91      | 0.068       | 15      | 31      | 48      | 75        | 10      | 36        |
| Карбонатные породы                                                              | 21      | 0.056      | 0.0022        | 26      | 0.58      | 0.038       | 1.7     | 30      | 7       | 12        | 2.6     | 6.6       |
| Кремнистые породы                                                               | 7       | 0.026      | 0.002         | 21      | 0.39      | 0.068       | 4.5     | He опр. | 16      | 15        | He опр. | 7         |
| Эвалориты                                                                       | He опр. | 0.08       | He опр.       | He опр. | He опр.   | 0.033       | He опр. | He опр. | He опр. | He опр.   | He опр. | He опр.   |
| Осадочные породы в целом                                                        | 31      | 0.11       | 0.00365       | 69      | 0.78      | 0.057       | 9.7     | 29      | 32      | 52        | 6.8     | 24        |
| Кислые вулканиды                                                                | 15      | 0.12       | 0.0039        | 35      | 0.2       | 0.058       | 4.2     | 24      | 31      | 58        | 10      | 27        |
| Средние вулканиды                                                               | 44      | 0.16       | 0.003         | 31      | 0.2       | 0.049       | 15      | 19      | 28      | 50        | 4       | 20        |
| Основные вулканиды                                                              | 73      | 0.083      | 0.0039        | 114     | 0.4       | 0.061       | 31      | 25      | 19      | 43        | 4.7     | 21        |
| Вулканиды в целом                                                               | 57      | 0.11       | 0.0036        | 79      | 0.31      | 0.057       | 23      | 23      | 23      | 47        | 5.1     | 21        |
| Осадочный слой                                                                  | 35      | 0.11       | 0.0036        | 71      | 0.71      | 0.066       | 12      | 28      | 30      | 51        | 6.6     | 24        |
| Граниты                                                                         | 10      | 0.086      | 0.0027        | 39      | 0.41      | 0.057       | 6.5     | 50      | 48      | 72        | 7.4     | 31        |
| Гранодиориты                                                                    | 29      | 0.14       | 0.0028        | 53      | 0.44      | 0.052       | 13      | 36      | 51      | 75        | 6.4     | 23        |
| Базиты                                                                          | 92      | 0.11       | 0.0035        | 110     | 0.4*      | 0.07        | 30      | 23      | 17      | 48        | 5       | 22        |
| Сениты                                                                          | 5       | 0.05       | 0.002         | 130     | 0.13*     | 0.026       | 3       | 17      | 45      | 95        | 10      | 42        |
| Ультрабазиты                                                                    | 10      | 0.14       | 0.006         | 46      | 0.05*     | 0.02        | 12      | 2       | 3.9     | 8.6       | 1.4     | 4.8       |
| Магматические породы                                                            | 24      | 0.1        | 0.0028        | 51      | 0.41      | 0.059       | 11      | 43      | 45      | 70        | 6.9     | 28        |
| Метапесчаники                                                                   | 44      | 0.1        | 0.0066        | 65      | 0.7*      | 0.08        | 5.4     | 15      | 22      | 37        | 5.2     | 24        |
| Парагнейсы, сланцы                                                              | 52      | 0.14       | 0.005         | 94      | 0.9*      | 0.085       | 16      | 24      | 32      | 76        | 11      | 36        |
| Карбонатные породы                                                              | 21      | 0.08       | 0.0053        | 59      | 0.6*      | 0.031       | 1.8     | 4       | 26      | 51        | 4.6     | 23        |
| Железистые породы                                                               | 57      | 0.044      | 0.0089        | 130     | He опр.   | 0.045       | He опр. | 20      | He опр. | He опр.   | He опр. | He опр.   |
| Параметаморфиты                                                                 | 50      | 0.13       | 0.0052        | 91      | 0.86*     | 0.082       | 14.4    | 23      | 31      | 71        | 10      | 34        |
| Гранито-гнейсы                                                                  | 29      | 0.081      | 0.0049        | 63      | 0.44*     | 0.058       | 21      | 17      | 33      | 65        | 11      | 32        |
| Метариолиты                                                                     | 28      | 0.11       | 0.0026        | 35      | 0.3*      | He опр.     | 9       | 53      | 20      | 43        | 3.1     | 11        |
| Метаандезиты                                                                    | 39      | 0.11       | 0.0036        | 100     | 0.3*      | He опр.     | 11      | 24      | 34      | 69        | He опр. | He опр.   |
| Метабазиты                                                                      | 86      | 0.1        | 0.0034        | 110     | 0.4*      | 0.049       | 34      | 24      | 12      | 26        | 3.2     | 13        |
| Ортометаморфиты                                                                 | 36      | 0.085      | 0.0048        | 69      | 0.43*     | 0.053       | 22      | 19      | 30      | 60        | 9.5     | 28        |
| Гранито-гнейсовый слой                                                          | 40      | 0.11       | 0.0046        | 76      | 0.62*     | 0.068       | 16.5    | 25      | 33      | 67        | 9.4     | 31        |
| Верхняя часть континентальной коры                                              | 39      | 0.11       | 0.0044        | 75      | 0.64*     | 0.065       | 15.6    | 26      | 32      | 63        | 8.7     | 29        |
| Upper continental crust. Литературные данные 1967–2004 гг. (Rudnick, Gao, 2004) | 14–32   | 0.05–0.055 | 0.0012–0.0018 | 52–71   | 0.075–0.1 | 0.012–0.096 | 7–15    | 17.4–24 | 28.4–71 | 57.5–66.4 | 6.3–7.1 | 25.6–30.4 |

Таблица 1.5  
Среднее содержание химических элементов (п-10<sup>-4</sup> %) в горных породах верхней части континентальной коры.  
Средние и тяжелые лантаноиды

| Горные породы, слои                                                             | Sm        | Eu        | Gd       | Tb       | Dy      | Ho        | Er      | Tm       | Yb        | Lu        |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|---------|-----------|---------|----------|-----------|-----------|
| Пески и песчаники                                                               | 3.8       | 0.84      | 2.8      | 0.7      | 2.9     | 1.5*      | 2.3     | 0.3*     | 1.8       | 0.3*      |
| Глины, глинистые сланцы                                                         | 8         | 1.2       | 5.8      | 0.83     | 4.4     | 0.9*      | 1.9     | 0.5      | 2.5       | 0.39      |
| Карбонатные породы                                                              | 1.9       | 0.5       | 1.5      | 0.38     | 2.9     | 0.35      | 0.75    | 0.14     | 0.9       | 0.11      |
| Кремнистые породы                                                               | Не опр.   | 0.28      | Не опр.  | 0.22     | 1.5     | Не опр.   | Не опр. | 0.4      | 2         | Не опр.   |
| Эвапориты                                                                       | Не опр.   | Не опр.   | Не опр.  | Не опр.  | Не опр. | Не опр.   | Не опр. | Не опр.  | Не опр.   | Не опр.   |
| Осадочные породы в целом                                                        | 5.5       | 0.94      | 4        | 0.69     | 3.6     | 0.92      | 1.7     | 0.42*    | 2         | 0.3       |
| Кислые вулканиты                                                                | 5.2       | 1.5       | 5        | 0.82     | 6       | 1.7       | 3.6     | 0.5*     | 2.5       | 0.55      |
| Средние вулканиты                                                               | 4.3       | 1.2       | 4.5      | 0.71     | 3       | 0.72      | 2.1     | 0.4      | 2         | 0.32      |
| Основные вулканиты                                                              | 5.1       | 1.6       | 5.1      | 0.95     | 5.1     | 1.3       | 2.6     | 0.4      | 2.3       | 0.46      |
| Вулканиты в целом                                                               | 4.9       | 1.5       | 4.9      | 0.86     | 4.6     | 1.2       | 2.6     | 0.41*    | 2.2       | 0.43      |
| Осадочный слой                                                                  | 5.4       | 1         | 4.2      | 0.72     | 3.8     | 0.96      | 1.9     | 0.42*    | 2         | 0.32      |
| Граниты                                                                         | 7.5       | 1.4       | 6.8      | 1.1      | 5       | 1.3       | 3.1     | 0.6*     | 4         | 0.9       |
| Гранодиориты                                                                    | 8.2       | 1.4       | 6.1      | 1.3      | 5.2     | 1.9       | 3.8     | 0.3      | 3.6       | 1.1       |
| Базиты                                                                          | 5.3       | 1.3       | 5.2      | 0.83     | 2.5     | 0.99      | 2.2     | 0.25     | 2         | 0.5       |
| Сyenиты                                                                         | 10        | 1.8       | 10       | 1.6      | 7       | 2         | 4.4     | 0.44     | 4.3       | 1.2       |
| Ультрабазиты                                                                    | 0.83      | 0.24      | 0.93     | 0.2      | 0.28    | 0.16      | 0.35    | 0.06     | 0.48      | 0.07      |
| Магматические породы                                                            | 7.4       | 1.4       | 6.4      | 1.1      | 4.8     | 1.4       | 3.2     | 0.48*    | 3.7       | 0.9       |
| Металесчаники                                                                   | 3.4       | 0.76      | 4.3      | 0.48     | 4.9     | 1         | 2.7     | 0.38     | 1.6       | 0.26      |
| Парагнейсы, сланцы                                                              | 6.4       | 1.4       | 7.5      | 0.94     | 5.7     | 1.7*      | 3.2     | 0.5*     | 2.5       | 0.54      |
| Карбонатные породы                                                              | 2.4       | 0.6       | 2.2      | 0.15     | 2.1     | 0.28      | 0.9     | 0.3*     | 0.7       | 0.1       |
| Железистые породы                                                               | Не опр.   | Не опр.   | Не опр.  | Не опр.  | Не опр. | Не опр.   | Не опр. | Не опр.  | 4.5       | Не опр.   |
| Параметаморфиты                                                                 | 6         | 1.3       | 7        | 0.87     | 5.5     | 1.6*      | 3       | 0.48*    | 2.4       | 0.5       |
| Гранито-гнейсы                                                                  | 5.1       | 1.5       | 8.1      | 0.94     | 5.2     | 1.3       | 2.9     | 0.34*    | 2.2       | 0.38      |
| Метариолиты                                                                     | 2.7       | 1.3       | 3.9      | 0.68     | Не опр. | Не опр.   | Не опр. | Не опр.  | 3.8       | Не опр.   |
| Метаандезиты                                                                    | 2.6       | 1.5       | Не опр.  | 1.5      | Не опр. | Не опр.   | Не опр. | Не опр.  | 3.5       | 0.51      |
| Метабазиты                                                                      | 3.7       | 1.4       | 3.9      | 0.88     | 4.2     | 1         | 2.5     | 0.46     | 2.9       | 0.48      |
| Ортометаморфиты                                                                 | 4.8       | 1.5       | 7.2      | 0.95     | 4.8     | 1.2       | 2.7     | 0.33*    | 2.4       | 0.39      |
| Гранитно-гнейсовый слой                                                         | 5.8       | 1.4       | 7        | 0.94     | 5.1     | 1.4*      | 2.9     | 0.43*    | 2.6       | 0.53      |
| Верхняя часть коры                                                              | 5.7       | 1.3       | 6.3      | 0.89     | 4.8     | 1.3*      | 2.7     | 0.42*    | 2.5       | 0.48      |
| Upper continental crust. Литературные данные 1967–2004 гг. (Rudnick, Gao, 2004) | 4.59–5.09 | 0.88–1.21 | 2.8–4.21 | 0.48–0.7 | 2.9–3.9 | 0.62–0.83 | 2.3     | 0.3–0.33 | 1.47–2.26 | 0.23–0.35 |

Таблица 1.6

Среднее содержание химических элементов (n·10<sup>-4</sup> %) в горных породах верхней части континентальной коры.

Актиноиды, подгруппы титана, ванадия и хрома

| Горные породы, слои                                                             | Th       | U       | Ti        | Zr      | Hf      | V       | Nb      | Ta       | Cr      | Mo       | W        |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|----------|
| Пески и песчаники                                                               | 6.7      | 2.0     | 3500      | 230     | 4.5     | 75      | 6.4     | 1        | 58      | 1.5      | 1.6      |
| Глины, глинистые сланцы                                                         | 14       | 4.3     | 4700      | 190     | 5       | 120     | 11      | 1.4      | 110     | 1.6      | 2.6      |
| Карбонатные породы                                                              | 4.3      | 2.2     | 610       | 51      | 0.61    | 49      | 0.8     | 0.1      | 20      | 1.6      | 1.2      |
| Кремнистые породы                                                               | 3.2      | 2.4     | 1700      | 19      | 1.5     | He опр. | He опр. | 0.3      | 32      | He опр.  | He опр.  |
| Эвалориты                                                                       | 0.7      | 0.68    | He опр.   | 33      | He опр. | He опр. | He опр. | He опр.  | He опр. | He опр.  | He опр.  |
| Осадочные породы в целом                                                        | 9.9      | 3.2     | 3500      | 170     | 3.9     | 91      | 7.6     | 1        | 76.6    | 1.53     | 2        |
| Кислые вулканиты                                                                | 13       | 4.5     | 1600      | 110     | 4.1     | 60      | 26      | 1.8      | 8.5     | 1.8      | 1.4      |
| Средние вулканиты                                                               | 4.1      | 1.1     | 4600      | 110     | 3.6     | 71      | 19      | 1        | 30      | 1.4      | 1.4      |
| Основные вулканиты                                                              | 2.7      | 0.86    | 7100      | 110     | 3.7     | 220     | 10      | 0.8      | 130     | 1.4      | 1.1      |
| Вулканиты в целом                                                               | 4.4      | 1.4     | 5670      | 110     | 3.7     | 160     | 15      | 1        | 85      | 1.45     | 1.23     |
| Осадочный слой                                                                  | 9.1      | 2.9     | 3830      | 160     | 3.9     | 100     | 8.7     | 1        | 78.1    | 1.53     | 1.88     |
| Граниты                                                                         | 18       | 3.9     | 1800      | 180     | 3.9     | 38      | 21      | 3.6      | 7.8     | 1.4      | 2.2      |
| Гранодиориты                                                                    | 9.9      | 2.7     | 3800      | 140     | 2.5     | 91      | 20      | 2.8      | 22      | 1.1      | 1.6      |
| Базиты                                                                          | 3.2      | 0.8     | 6600      | 130     | 2.6     | 240     | 19      | 0.74     | 175     | 1.5      | 0.75     |
| Снгиты                                                                          | 13       | 3       | 4000      | 500     | 11      | 30      | 35      | 2.1      | 2       | 1.1      | 0.16     |
| Ультрабазиты                                                                    | 0.004    | 0.001   | 3600      | 43      | 0.46    | 42      | 13      | 0.41     | 1800    | 0.3      | 0.3      |
| Магматические породы                                                            | 14       | 3.2     | 2870      | 160     | 3.4     | 75      | 20.5    | 3        | 37.2    | 1.33     | 1.87     |
| Метапесчаники                                                                   | 7.3      | 1.7     | 2900      | 170     | 4.7     | 80      | 7.1     | 0.45     | 65      | 1.5      | 2.1      |
| Парагнейсы, сланцы                                                              | 9.2      | 2.3     | 3500      | 150     | 5.5     | 180     | 15      | 1.1      | 140     | 1.9      | 2.6      |
| Карбонатные породы                                                              | 1.7      | 0.7     | 480       | 32      | He опр. | 31      | 1.4     | 0.3      | 43      | 1.2      | 1.7      |
| Железистые породы                                                               | –        | He опр. | 1800      | 30      | He опр. | 35      | 14      | 0.3      | 36      | 4        | He опр.  |
| Параметаморфиты                                                                 | 8.7      | 2.2     | 4470      | 150     | 5.2     | 170     | 14      | 1        | 129     | 1.86     | 2.5      |
| Гранито-гнейсы                                                                  | 8.0      | 2.4     | 3300      | 190     | 5.1     | 86      | 9.8     | 1.6      | 61      | 1.3      | 1.4      |
| Метариолиты                                                                     | 9.5      | He опр. | 2300      | 170     | 7.6     | 42      | 14      | 1.2      | 33      | 1.2      | He опр.  |
| Метаандезиты                                                                    | 6*       | He опр. | 4600      | 160     | He опр. | 110     | 8.1     | 1.3      | 47      | 2.2      | He опр.  |
| Метабазиты                                                                      | 3.9      | 0.9     | 8600      | 110     | 2.3     | 240     | 6.8     | 0.56     | 270     | 1.2      | 4        |
| Ортометаморфиты                                                                 | 7.4      | 2.2     | 3830      | 180     | 4.6     | 100     | 9.5     | 1.5      | 84.2    | 1.32     | 1.62     |
| Гранито-гнейсовый слой                                                          | 9.2      | 2.4     | 3960      | 160     | 4.7     | 130     | 13      | 1.5      | 96.8    | 1.57     | 2.07     |
| Верхняя часть континентальной коры                                              | 9.1      | 2.5     | 3930      | 160     | 4.5     | 120     | 12      | 1.4      | 92.4    | 1.56     | 2.03     |
| Upper continental crust. Литературные данные 1967–2004 гг. (Rudnick, Gao, 2004) | 8.6–10.8 | 1.5–2.8 | 3000–4000 | 160–237 | 4.3–5.8 | 53–107  | 9.8–26  | 0.74–5.7 | 35–112  | 0.78–1.5 | 0.91–3.3 |

Таблица 1.7

**Возможное среднее содержание платиноидов ( $10^{-6}$  %) в некоторых из важнейших горных пород верхней части континентальной коры**

| Горные породы                                                                            | Ru      | Rh      | Pd              | Os               | Ir               | Pt         |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|-----------------|------------------|------------------|------------|
| Пески и песчаники                                                                        | 0.65    | 0.5     | 14?             | Не опр.          | Не опр.          | 3          |
| Глины, сланцы                                                                            | 0.85    | 1.1     | 6.2             | Не опр.          | Не опр.          | 1.4        |
| Средние вулканиды                                                                        | Не опр. | Не опр. | 0.6             | Не опр.          | Не опр.          | Не опр.    |
| Основные вулканиды                                                                       | 0.22    | 0.1     | 0.7             | -                | 0.09             | 0.7        |
| Граниты                                                                                  | Не опр. | Не опр. | 0.3             | 0.004            | 0.004            | 0.8        |
| Гранодиориты                                                                             | 1.7     | 0.16    | 0.6             | Не опр.          | 0.004            | Не опр.    |
| Базиты                                                                                   | 5.6     | Не опр. | 3               | 0.05             | 0.03             | 7          |
| Ультрабазиты                                                                             | 2.3     | 0.5     | 2               | Не опр.          | 0.2              | 14         |
| Метапесчаники                                                                            | Не опр. | 1.3     | 97?             | Не опр.          | Не опр.          | 38         |
| Парагнейсы, сланцы                                                                       | Не опр. | 3.4     | 160?            | Не опр.          | Не опр.          | 9          |
| Метабазиты                                                                               | 1.8     | 1.3     | 60?             | Не опр.          | 0.27             | 33         |
| Upper Continental Crust.<br>Литературные данные<br>1967–2004 гг. (Rudnick,<br>Gao, 2004) | 0.034   |         | 0.052–<br>0.146 | 0.0031–<br>0.005 | 0.002–<br>0.0022 | 0.05–0.051 |

Таблица 1.8

**Варианты среднего содержания (%) наиболее важных химических элементов в верхней части континентальной коры**

| Химические элементы | Предлагаемый вариант | Континентальная кора<br>(Резанов, 2002) |                | Upper Continental Crust.,<br>по данным других<br>исследователей<br>(Rudnick, Gao, 2004) |
|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|                     |                      | Первый вариант                          | Второй вариант |                                                                                         |
| Si                  | 28.32                | 26.53                                   | 28.89          | 30.26–31.74                                                                             |
| Ti                  | 0.393                | 0.34                                    | 0.34           | 0.3–0.64                                                                                |
| Al                  | 7.61                 | 7.7                                     | 7.77           | 7.5–8.52                                                                                |
| Fe                  | 4.06                 | 4.03                                    | 4.02           | 3.18–4.49                                                                               |
| Mn                  | 0.077                | 0.062                                   | 0.062          | 0.054–0.077                                                                             |
| Mg                  | 1.77                 | 1.61                                    | 1.64           | 1.27–1.82                                                                               |
| Ca                  | 3.89                 | 4.11                                    | 3.9            | 2.43–3.03                                                                               |
| Na                  | 2.07                 | 2.04                                    | 2.01           | 2.09–2.89                                                                               |
| K                   | 2.23                 | 2.31                                    | 2.35           | 2.22–2.81                                                                               |
| P                   | 0.069                | 0.061                                   | 0.061          | 0.052–0.081                                                                             |
| S                   | 0.81                 | 0.88                                    | 0.76           | 0.32                                                                                    |
| S                   | 0.14                 | 0.126                                   | 0.098          | 0.031–0.095                                                                             |
| F                   | 0.051                | 0.2                                     | 0.17           | 0.05–0.061                                                                              |
| Cl                  | 0.15                 | 0.19                                    | 0.17           | 0.01–0.064                                                                              |
| H                   | 0.167                | 0.12                                    | 0.1            | Не опр.                                                                                 |

ант отличается главным образом несколько меньшим содержанием Si и большим Ca (табл. 1.8).

Большая часть приводимых нами значений средних содержаний химических элементов в верхней части континентальной коры не выходит за пределы тех величин, которые публиковали другие исследователи в течение последних 50 лет (см. табл. 1.1–1.7).

Публикуемые данные учитывают результаты многочисленных количественных анализов, поэтому по меньшей мере часть из них может служить основой для решения вопросов о распределении масс химических элементов в верхней части континентальной коры. Приведенные величины корректны в отношении тех исходных данных, которыми располагал автор, но они имели существенные недостатки. Отметим два главных. Первый – модель А.Б. Ронова и др. (1990) не вполне соответствует задаче, поставленной автором. В частности, она не позволяет учесть соотношение масс горных пород, близких или одинаковых в петрографическом и литологическом отношении, но различающихся по генезису и как следствие по содержанию большинства химических элементов. Второй – недостаточное количество данных о вариациях содержаний многих элементов в горных породах. Содержания большинства химических элементов в горных породах сильно варьируют, причем тем сильнее, чем меньше среднее содержание химического элемента в земной коре (см. главу 2). Эти вариации – главная причина того, что приводимые разными исследователями цифры среднего содержания одного и того же химического элемента в горных породах или в верхней части континентальной коры в целом различаются существенно, иногда в несколько раз. Отношение автора к ряду полученных цифр было критическим (Григорьев, 2003), что послужило главной причиной новых расчетов, выполненных в 2003–2008 гг. с учетом дополнительных литературных данных, опубликованных преимущественно после 2002 г. Автору пока не удалось пересмотреть все те цифры, которые хотя и соответствуют доступным исходным данным, вызывают сомнение. Отметим некоторые из наиболее сомнительных величин. Возможно, преувеличено среднее содержание: Ni – в парагнейсах и парасланцах; Ga, In, Eu, Gd, Tb, Dy, V – в ортометаморфических породах; Cd, Br, Y, Pr, Nd, U, Th, Zr – в осадочных породах; As – в метаандезитах; Sc – в гранито-гнейсах; Ho, Er, Lu – в песках и метаморфических породах; Cl – в эвапоритах, Yb – в кремнистых сланцах. Возможно, преуменьшено среднее содержание Na, Pb, Nb, Ta в осадочных породах; Cs – в гранито-гнейсах; Tl – в метаморфических породах; Ge – в ортометаморфических, Sn – в глинистых.

Таким образом, полученные данные нуждаются в уточнении и дополнении. Отчасти эта задача может быть решена с учетом появляющихся в литературе новых данных о вариациях содержаний химических элементов в горных породах. Это задача дальнейших исследований. Но для радикального решения вопроса нужна более совершенная модель строения верхней части континентальной коры.

С учетом этого рассмотрим кратко вопрос о том, в какой мере химический состав осадочных пород, входящих в состав континентальной коры, соответствует полному набору продуктов выветривания гранито-гнейсового слоя. В остаточных продуктах выветривания магматических и метаморфических пород, как правило, почти полностью сохраняются массы Al и Ti, растворяющиеся же небольшие части масс этих элементов почти полностью осаждаются на континентах или в прибрежно-морских отложениях. Лишь ничтожные части масс этих элементов мигрируют в

качестве компонентов гидросферы, атмосферы и биосферы. Поэтому распределение этих элементов в пределах верхней части континентальной коры теоретически соответствует требованиям геохимического баланса. Критерий соответствия – коэффициент концентрации (КК) химического элемента в осадочных породах в отношении гранитно-гнейсового слоя. По величине этого коэффициента химические элементы образуют четыре группы.

Химические элементы, избыточные в осадочных породах, %: Cl – 30, C – 9.6, S – 4, B – 2.9, H – 2.5, Ca – 2.5, Cs – 2.2, Se – 1.8, As – 1.5, U – 1.5.

Химические элементы, возможно избыточные в осадочных породах, %: Li – 1.2, Ge – 1.2, Y – 1.2, Zr – 1.1, Sb – 1.1, Mg – 1.1, P – 1, Sr – 1, La – 1, O – 1, Ag – 1, Mn – 1.

Химические элементы, содержание которых в осадочных породах приблизительно соответствует требованиям геохимического баланса, %: Ti – 0.9, F – 0.9, K – 0.9, Rb – 0.9, Be – 0.9, Fe – 0.9, Sm – 0.9, Mo – 0.9, Zn – 0.9, Ba – 0.8, Co – 0.8, Cu – 0.8, Hg – 0.8, Au – 0.8, Al – 0.8, Si – 0.8, Ce – 0.8, Nd – 0.8, Yb – 0.8, Th – 0.8, Bi – 0.8, Cr – 0.8.

Химические элементы, содержание которых в осадочных породах несколько меньше, чем должно быть в полном наборе продуктов выветривания гранитно-гнейсового слоя, %: Pr – 0.7, Eu – 0.7, Ta – 0.7, Sn – 0.7, Tb – 0.7, Dy – 0.7, Ho – 0.7, Ni – 0.7, Na – 0.6, Ga – 0.6, Pb – 0.6, Sc – 0.6, Gd – 0.6, Er – 0.6.

Избыток в осадочных породах летучих компонентов понятен. Некоторый недостаток Na в осадочных породах континентальной коры может быть следствием накопления его в океанах. Относительно избытка и недостатка в осадочных породах других химических элементов, то здесь далеко идущие выводы преждевременны. Пока наиболее актуально уточнение средних содержаний этих элементов в горных породах.

### 1.1.3. Выводы

Приведенные данные о среднем содержании химических элементов в горных породах, слагающих осадочный и гранитно-гнейсовый слои континентальной коры, являются наиболее полными. Для H, Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, B, Al, Ga, C, Si, Ge, Sn, Pb, P, As, Sb, Bi, O, S, F, Cl, Cu, Ag, Au, Zn, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Yb, Lu, Th, U, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni получены полные или почти полные наборы данных о средних содержаниях в горных породах, достаточные для приблизительной оценки распределения масс отмеченных химических элементов в ассоциации горных пород, слагающих верхнюю часть континентальной коры. Таким образом, создана предпосылка для приблизительного определения роли минералов-концентраторов как носителей этих химических элементов в важнейших горных породах и в верхней части континентальной коры в целом. Еще для нескольких химических элементов получены эпизодические данные. Для их дополнения и уточнения необходимо накопление новых сведений о вариациях содержания химических элементов в горных породах.

## 1.2. СРЕДНИЙ МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ

### 1.2.1. Методика определения средних содержаний минералов в горных породах

Первые определения среднего минерального состава земной коры были выполнены на границе XIX и XX вв. Но внимания этой проблеме уделяли мало (Ферсман, 1933). До 1999 г. было опубликовано около восьми определений среднего минерального состава земной коры и верхних ее слоев. Во всех случаях проводили пересчет предполагаемого среднего химического состава этих объектов на совокупности из 6–20 минералов теоретического состава (Clarke, 1924; Berg, 1929; Wedepohl, 1967; Ферсман, 1933; Ронов, Ярошевский, 1967; Мейсон, 1971; Nessbitt, Young, 1984; Булах, 1996). Более подробные данные появились в 1999 г. Автором из литературы были выбраны результаты количественных минералогических анализов отдельных эталонных проб важнейших горных пород и скорректированы для приведения в соответствие со средним химическим составом важнейших групп горных пород по модели А.Б. Ронova с коллегами (1990). По этим данным рассчитано среднее содержание 41 минерала и трех неминеральных веществ в верхней части земной коры и в слагающих ее слоях (Григорьев, 1999). Впоследствии автором выполнено несколько более корректных расчетов минерального состава. Ниже приведены последние данные.

Среднее содержание минералов в горных породах рассчитано преимущественно по результатам количественных минералогических анализов. Лишь для эвапоритов проведен пересчет среднего химического состава на совокупность важнейших минералов. Результаты количественных минералогических анализов более чем 3000 проб и образцов в основном заимствованы из литературы. Учтены также известные автору полуколичественные оценки минерального состава горных пород. Наиболее важные первоисточники данных о содержании минералов (преимущественно акцессорных) в относительно распространенных горных породах названы ниже в разделах этой главы. Первоисточники данных о содержании рудных и акцессорных минералов в горных породах литогеохимических ореолов и в редкометалльных рудах, использованные при расчетах, приведены в последующих главах. Методика расчетов определялась характером исходных данных. В этом отношении минералы можно условно разделить на три группы.

Первую составляют порообразующие минералы, а также нередко относимые к ним пирит, пирротин, магнетит, гематит, ильменит, титанит. Исходные данные о вариациях содержаний этих минералов в горных породах заимствованы преимущественно из работ петрографической и литологической ориентации. Средний минеральный состав горных пород и верхней части континентальной коры в целом, рассчитанный по результатам минералогических анализов, не вполне соответствует среднему химическому составу этих объектов. Например, расчет минерального баланса Fe по данным В.В. Ляховича (1967) о среднем минеральном составе грани-



тов дает сумму учтенных долей массы Fe 74.84%. Предполагалось, что это отчасти результат недостаточной изученности вариаций минерального состава горных пород, особенно осадочных и метаморфических. Кроме того, раньше было показано, что из-за несовершенства преобладающих методик количественного минералогического анализа неизбежно систематическое преуменьшение содержания второстепенных минералов в изучаемых пробах, причем даже приблизительная оценка величин этого преуменьшения не всегда возможна (Григорьев, 1999). Поэтому для получения сбалансированной системы данных пришлось корректировать результаты определений среднего содержания 66 наиболее распространенных минералов и неминеральных веществ в горных породах. Корректировка была проведена путем синхронного расчета средних минеральных балансов наиболее важных химических элементов в горных породах. В каждом конкретном расчете учитывалось от 29 до 44 минералов и неминеральных веществ, главных для данной горной породы. Используемые эталоны – разновидности минералов с химическим составом, близким к модальному. Результаты корректировки считались удовлетворительными при суммах учтенных долей масс O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, а также C (при содержании C в горных породах > 0.5%), равных 95–105%. Контрольным был синхронный расчет среднего минерального баланса отмеченных химических элементов в верхней части континентальной коры в целом. При контрольном расчете учитывалось 66 минералов, минеральных разновидностей и неминеральных веществ.

Вторую группу составляют наиболее известные минералам тяжелые акцессорные минералы: халькопирит, сфалерит, галенит, молибденит, флюорит, шпинель, корунд, рутил, касситерит, анатаз, малахит, монацит, апатит, альмандин, циркон, циртолит, торит, дистен, топаз, ставролит, лейкоксен, ортит, турмалин и др. В литературе опубликованы результаты количественных и приближенно-количественных определений содержания этих акцессорных минералов более чем в 2000 пробах горных пород. Здесь приведены преимущественно средние арифметические содержания этих минералов в горных породах, но при расчете средних арифметических значений содержания часто учитывалось (с помощью коэффициентов) разное качество исходных данных. Одни авторы публиковали результаты анализа отдельных проб, другие – обобщенные результаты анализа многих проб. Одни исследователи изучили распространенные разновидности горных пород, другие – менее распространенные.

Третью группу составляет минералы, данные о которых имеются преимущественно в работах, посвященных проблеме потенциального минерального сырья. Пример – минералы бериллиевые, литиевые, большинство марганцевых, некоторые алюминиевые и др. Среднее содержание таких минералов определено приблизительно с учетом закономерностей вариаций содержания информативных элементов (Be, Li, Mn, Al и др.) и их минеральных балансов в горных породах. Методы расчетов варьировали в зависимости от характера исходных данных. Подробнее этот вопрос рассматривается в следующих главах при характеристике конкретных химических элементов.

### 1.2.2. Средний минеральный состав горных пород осадочного слоя

Представление об осадочном слое континентальной коры нуждается в детализации и уточнении. А.Б. Роновым с коллегами (1990) в него включены осадочные и вулканогенные породы преимущественно фанерозойского и верхнепротерозойского возраста, т. е. теоретически в качестве осадочного слоя рассматриваются преимущественно горные породы, находящиеся выше нижней границы верхнего протерозоя, за исключением магматических и метаморфических пород. Но в литературе метаморфическим породам часто давали названия исходных осадочных и вулканогенных пород. В результате в составе осадочных и вулканогенных пород оказалось учтено неопределенное количество метаморфических. Это видно по данным о среднем химическом составе горных пород (в частности по содержанию  $H_2O^+$ ). Для устранения этого недостатка необходима разработка новой модели. В рамках же существующей нужна была отмеченная выше корректировка данных о среднем минеральном составе осадочных и вулканогенных пород для приведения их в соответствие со средним содержанием главных химических элементов, соответствующих модели А.Б. Ронина и др. (1990).

Доли масс важнейших горных пород в осадочном слое, %: пески и песчаники – 21.63; глины и глинистые сланцы – 44.01; карбонатные породы – 16.29; кремнистые породы – 1.4; эвапориты – 1.1; кислые вулканиты – 1.86; средние вулканиты – 4.78; основные вулканиты – 8.93.

Наиболее важные первоисточники данных, использованных при расчетах, перечислены ниже при характеристике горных пород.

#### **Осадочные породы.**

*Пески и песчаники.* Пески Русской платформы от современных до палеозойских (Ронов и др., 1963; Балашов, 1976); четвертичные пески донной морены ледника в восточной части Балтийского щита (Ильин, Сыромятина, 1972); голоценовые континентальные пески Калифорнии (Van de Kamp, 1973); третичные глауконитовые пески Украины (Карякин, 1951); кайнозойские песчаники украинского Предкарпатья (Габинет и др., 1966); юрско-олигоценные морские пески района Курской магнитной аномалии (Кузнецов, 1992); пески из красноцветных терригенных отложений нижнего триаса в Северном Приуралье (Челышев и др., 1965); песчаники Восточной Камчатки (Малиновский, 1990); пермские континентальные и морские пески северо-восточной Англии и прилегающей части Северного моря (Pryor, 1971); пермские и каменноугольные аркозовые песчаники и пески Колорадо и Юты (Van de Kamp, Leake, 1994); палеозойские песчаники Центрального Таджикистана (Бабкин, 1986).

*Глины и глинистые сланцы.* Четвертичные морские алевритовые глины севера Западно-Сибирской низменности (Шумилова, 1971); четвертичные глины Предкарпатского сероносного бассейна (Даденко, 1969); континентальные и морские суглинки Мексики (Мило, 1968); позднелиценские глины Татарской АССР (Кирсанов и др., 1965); кайнозойские аргиллиты украинского Предкарпатья (Габинет и др., 1966); разновозрастные бентонитовые глины СССР (Кирсанов и др., 1981; Баталин и др., 1975); морские суг-

линки Курской магнитной аномалии от эоценовых до девонских (Кузнецов, 1992); мезозойские глины, вмещающие бокситы Мугайского месторождения в Зауралье (Ситникова, 1975; Гуткин и др., 1969); верхнеюрский аргиллит Западно-Сибирской плиты (Плуман, 1975); триасовые глины Северного Приуралья (Челышев и др., 1965). Триасовые и палеозойские филлиты Калифорнии (Davis et al., 1965); девонские аллиты, вмещающие месторождения бокситов на Полярном Урале (Ушатинский, Боровской, 1977, 1978); палеозойские глины и аргиллиты Сибирской и Русской платформ (Акульшина, 1971); пермские и каменноугольные глинистые сланцы Юты и Колорадо (Van de Kamp, Leake, 1994); карбоновые аргиллиты Донбасса (Нырков, 1956); верхнеордовикские сланцы Огайо, Индианы, Кентукки (Scotford, 1965).

*Карбонатные породы.* Третичные известняки Западной Украины (Боровник, Хмелевский, 1966); известняки Русской платформы от меловых до докембрийских (Тимофеев, 1960); карбонатные породы Калифорнии триасовые и палеозойские (Davis et al., 1965); мергель (проба № 428) из сероносного бассейна Предкарпатья (Даценко, 1969); глинистая часть палеозойских известняков и мергелей Западно-Сибирской и Русской платформ (Акульшина, 1971); кембрийские известняки Западной Сибири (Сухарина, 1976); рифейские карбонатные породы Башкирского мегантиклинория на Южном Урале (Анфимов, 1997).

*Кремнистые породы.* Третичные кремнистые породы Украины (Корякин, 1954); филлитовидные кварциты Калифорнии (Davis et al., 1965).

*Эвапориты.* Соляные отложения Приуралья, Поволжья, Тимана и Западной Украины (Билоножка и др., 1966; Кольцова, Яржемский, 1969; Лобанова, 1969; Юшкин, 1989). Анализы преимущественно качественные.

Величины среднего содержания наиболее распространенных минералов в осадочных породах (табл. 1.9) скорректированы для приведения их в соответствие со средним химическим составом горных пород по А.Б. Ронову с коллегами (1990). Таким образом, в приводимых цифрах отражено включение в осадочные породы некоторого количества метаморфических. Группа горных пород «глины и глинистые сланцы», имеющая наибольшую массу, фактически состоит из двух групп: глин и сланцев. Эти две группы наиболее сильно отличаются по содержанию глинистых минералов (гидрослюд, смектитов, каолинита) и кварца. В глинах и суглинках содержание глинистых минералов варьирует преимущественно от 25 до 85%, кварца – 0–25%. В глинистых сланцах и филлитах глинистых минералов 0–40%, кварца – 24–50. Соотношение масс этих групп горных пород в слое неизвестно. Но, вероятно, сланцев (включая учтенные метаморфические) на порядок больше, чем глин.

Согласно полученным данным (см. табл. 1.9), массу континентальных осадочных пород составляют, %: эндогенные минералы – 46; экзогенные минералы и органические вещества – 54. Остаточными продуктами выветривания эндогенных минералов (гидрослюдами, смектитами, каолинитом и другими) представлено 48% массы экзогенных минералов. Карбонатами и другими минералами, образовавшимися осаждением из растворов или за счет живых организмов, представлено 51.6% массы экзогенных минералов. Такое соотношение не соответствует современным представлениям о про-

Таблица 1.9

## Среднее содержание минералов (%) в осадочных породах континентальной коры

| Минералы                   | Песчаники<br>и пески | Глины<br>и сланцы   | Карбонатные<br>породы | Кремнистые<br>породы | Эвапориты         | Осадочные<br>породы |
|----------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Самородные элементы</i> |                      |                     |                       |                      |                   |                     |
| Медь                       | $1 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $26 \cdot 10^{-9}$  |
| Серебро                    | $2.5 \cdot 10^{-8}$  | $1.2 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $6.9 \cdot 10^{-8}$ |
| Золото                     | $5.6 \cdot 10^{-8}$  | $4.6 \cdot 10^{-8}$ | $1 \cdot 10^{-8}$     | Не опр.              | Не опр.           | $4 \cdot 10^{-8}$   |
| Олово                      | $7 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $18 \cdot 10^{-8}$  |
| Графит                     | 0.0002               | 0.1                 | 0.1                   | 0.2                  | Не опр.           | 0.075               |
| Муассанит                  | $6 \cdot 10^{-8}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $15 \cdot 10^{-9}$  |
| Сера                       | Не опр.              | 0.0005              | 0.001                 | Не опр.              | Не опр.           | $4.5 \cdot 10^{-4}$ |
| <i>Сульфиды</i>            |                      |                     |                       |                      |                   |                     |
| Халькозин                  | $1 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | $1 \cdot 10^{-9}$ | $2.6 \cdot 10^{-8}$ |
| Борнит                     | $1 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $2.6 \cdot 10^{-8}$ |
| Акантит                    | $8 \cdot 10^{-9}$    | $4 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $2.3 \cdot 10^{-8}$ |
| Аргентит                   | $1.5 \cdot 10^{-8}$  | $7 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $3.4 \cdot 10^{-8}$ |
| Сфалерит                   | $1 \cdot 10^{-5}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $26 \cdot 10^{-7}$  |
| Халькопирит                | $3 \cdot 10^{-6}$    | $3 \cdot 10^{-6}$   | $6 \cdot 10^{-6}$     | Не опр.              | Не опр.           | $35 \cdot 10^{-7}$  |
| Тетраэдрит                 | $1.2 \cdot 10^{-8}$  | $6 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $3.4 \cdot 10^{-8}$ |
| Фрейбергит                 | $8 \cdot 10^{-9}$    | $4 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $2.3 \cdot 10^{-8}$ |
| Пирротин                   | $1 \cdot 10^{-5}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $26 \cdot 10^{-7}$  |
| Галенит                    | $7 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $18 \cdot 10^{-8}$  |
| Киноварь                   | Не опр.              | Не опр.             | $16 \cdot 10^{-8}$    | Не опр.              | Не опр.           | $3 \cdot 10^{-8}$   |
| Антимонит                  | $1 \cdot 10^{-8}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $2.6 \cdot 10^{-9}$ |
| Стефанит                   | $7 \cdot 10^{-9}$    | $3.4 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $2 \cdot 10^{-8}$   |
| Пираргирит                 | $1.5 \cdot 10^{-8}$  | $8 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $4.6 \cdot 10^{-8}$ |
| Пирит                      | 0.018                | 0.15                | 0.1                   | 0.005                | 0.0001            | 0.1                 |
| Марказит                   | Не опр.              | 0.005               | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | 0.0026              |
| Арсенопирит                | $3 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $8 \cdot 10^{-8}$   |
| Молибденит                 | $2 \cdot 10^{-8}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $5 \cdot 10^{-9}$   |
| <i>Галогениды</i>          |                      |                     |                       |                      |                   |                     |
| Галит                      | Не опр.              | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | 74                | 0.96                |
| Сильвин                    | Не опр.              | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | 0.25              | 0.0033              |
| Хлораргирит                | $8 \cdot 10^{-9}$    | $4 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $2.3 \cdot 10^{-8}$ |
| Флюорит                    | $5 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-7}$     | Не опр.              | Не опр.           | $2 \cdot 10^{-7}$   |
| Бишофит                    | Не опр.              | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | 0.01              | 0.00013             |
| Карналлит                  | Не опр.              | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | 0.05              | 0.00065             |
| <i>Оксиды</i>              |                      |                     |                       |                      |                   |                     |
| Периклаз                   | $5 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $13 \cdot 10^{-8}$  |
| Шпинель                    | 0.0026               | 0.0004              | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | 0.0009              |
| Магнетит                   | 0.18                 | 0.05                | Не опр.               | 0.008                | 0.0005            | 0.072               |
| Хромит                     | 0.0003               | 0.0001              | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $1.3 \cdot 10^{-4}$ |
| Хризоберилл                | $2.5 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $6.4 \cdot 10^{-7}$ |
| Корунд                     | $1.3 \cdot 10^{-4}$  | 0.003               | 0.0001                | Не опр.              | Не опр.           | 0.0016              |

Продолжение табл. 1.9

| Минералы          | Песчаники<br>и пески | Глины<br>и сланцы | Карбонатные<br>породы | Кремнистые<br>породы | Эвапориты         | Осадочные<br>породы |
|-------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| Гематит           | 0.017                | 0.097             | 0.015                 | 0.004                | 0.05              | 0.059               |
| Ильменит          | 0.2                  | 0.05              | Не опр.               | 0.13                 | 0.0002            | 0.08                |
| Кварц             | 34.5                 | 19.7              | 3.6                   | 57.8                 | 0.2               | 20.76               |
| Опал              | 8.2                  | 6.86              | 3                     | 15.4                 | 0.1               | 6.51                |
| Пирролюзит        | $5.3 \cdot 10^{-4}$  | 0.0023            | 0.0002                | 0.012                | Не опр.           | 0.0016              |
| Рутил             | 0.04                 | 0.03              | 0.004                 | 0.06                 | $1 \cdot 10^{-5}$ | 0.028               |
| Касситерит        | $8 \cdot 10^{-7}$    | $5 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $4.7 \cdot 10^{-7}$ |
| Криптомелан       | $1 \cdot 10^{-4}$    | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-5}$     | $9 \cdot 10^{-4}$    | Не опр.           | $2.6 \cdot 10^{-4}$ |
| Псиломелан        | $5 \cdot 10^{-4}$    | 0.0015            | $1 \cdot 10^{-4}$     | 0.008                | Не опр.           | 0.0011              |
| Тодорокит         | $5 \cdot 10^{-4}$    | $5 \cdot 10^{-4}$ | $7 \cdot 10^{-5}$     | 0.0018               | Не опр.           | $4.3 \cdot 10^{-4}$ |
| Вернадит          | $1 \cdot 10^{-5}$    | $2 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-5}$     | $8 \cdot 10^{-4}$    | Не опр.           | $1.3 \cdot 10^{-4}$ |
| Анатаз            | 0.024                | 0.0003            | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | 0.0063              |
| Брукит            | 0.0003               | $6 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $8 \cdot 10^{-5}$   |
| Бадделейт         | $6 \cdot 10^{-6}$    | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $15 \cdot 10^{-7}$  |
| <i>Гидроксиды</i> |                      |                   |                       |                      |                   |                     |
| Гиббсит           | 0.017                | 0.39              | 0.012                 | Не опр.              | Не опр.           | 0.21                |
| Диаспор           | 0.0021               | 0.049             | 0.0016                | Не опр.              | Не опр.           | 0.026               |
| Гетит             | 0.6                  | 0.4               | 0.2                   | 1                    | Не опр.           | 0.42                |
| Манганит          | 0.0002               | 0.001             | $1 \cdot 10^{-4}$     | 0.01                 | Не опр.           | $7.6 \cdot 10^{-4}$ |
| Бемит             | 0.0074               | 0.17              | 0.0051                | Не опр.              | Не опр.           | 0.092               |
| <i>Карбонаты</i>  |                      |                   |                       |                      |                   |                     |
| Магнезит          | Не опр.              | 0.005             | 0.03                  | Не опр.              | Не опр.           | 0.0084              |
| Сидерит           | 0.02                 | 0.03              | 0.055                 | Не опр.              | 0.0001            | 0.031               |
| Родохрозит        | $5.2 \cdot 10^{-4}$  | 0.0019            | 0.0007                | 0.0098               | Не опр.           | 0.0014              |
| Кальцит           | 5.5                  | 4                 | 67                    | 1.5                  | 0.01              | 16.45               |
| Mn-кальцит        | 0.0006               | 0.0019            | 0.0041                | 0.0037               | Не опр.           | 0.002               |
| Доломит           | 0.01                 | 0.1               | 11.5                  | Не опр.              | 1                 | 2.29                |
| Арагонит          | Не опр.              | Не опр.           | 1                     | Не опр.              | Не опр.           | 0.19                |
| Кутнагорит        | $5.5 \cdot 10^{-4}$  | 0.0018            | 0.0014                | 0.0052               | Не опр.           | 0.0014              |
| Анкерит           | 0.005                | 0.05              | 0.3                   | Не опр.              | Не опр.           | 0.085               |
| Азурит            | $4 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $1 \cdot 10^{-7}$   |
| Малахит           | $5 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $13 \cdot 10^{-8}$  |
| Давсонит          | 0.001                | 0.001             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | $78 \cdot 10^{-5}$  |
| Бисмутит          | $6.2 \cdot 10^{-8}$  |                   |                       |                      |                   | $1.6 \cdot 10^{-8}$ |
| <i>Сульфаты</i>   |                      |                   |                       |                      |                   |                     |
| Ангидрит          | 0.03                 | 0.03              | Не опр.               | Не опр.              | 16                | 0.23                |
| Целестин          | Не опр.              | 0.001             | 0.0018                | Не опр.              | Не опр.           | $7.8 \cdot 10^{-4}$ |
| Барит             | 0.007                | 0.0026            | 0.0015                | Не опр.              | Не опр.           | 0.0034              |
| Ярозит            | 0.0016               | 0.003             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.           | 0.002               |
| Кизерит           | Не опр.              | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | 0.33              | 0.0034              |
| Гипс              | Не опр.              | 0.014             | 0.07                  | Не опр.              | 8                 | 0.12                |

Продолжение табл. 1.9

| Минералы                   | Песчаники<br>и пески | Глины<br>и сланцы | Карбонатные<br>породы | Кремнистые<br>породы | Эвапориты | Осадочные<br>породы |
|----------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------|---------------------|
| <i>Вольфраматы</i>         |                      |                   |                       |                      |           |                     |
| Вольфрамит                 | $3 \cdot 10^{-7}$    | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | $7.7 \cdot 10^{-8}$ |
| Шеелит                     | $1.5 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | $3.8 \cdot 10^{-8}$ |
| <i>Фосфаты</i>             |                      |                   |                       |                      |           |                     |
| Ксенотим                   | $4 \cdot 10^{-5}$    | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | $1 \cdot 10^{-5}$   |
| Монацит                    | 0.0015               | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | $3.8 \cdot 10^{-4}$ |
| Апатит                     | 0.049                | 0.0022            | Не опр.               | 0.005                | 0.0001    | 0.014               |
| С-апатит                   | 0.16                 | $1 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.041               |
| <i>Островные силикаты</i>  |                      |                   |                       |                      |           |                     |
| Фенакит                    | $1 \cdot 10^{-6}$    | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | $2.5 \cdot 10^{-7}$ |
| Альмандин                  | 0.032                | 0.005             | Не опр.               | 0.4                  | 0.0001    | 0.017               |
| Гроссуляр                  | Не опр.              | Не опр.           | 0.05                  | Не опр.              | Не опр.   | 0.0097              |
| Циркон                     | 0.011                | 0.0078            | $5 \cdot 10^{-7}$     | Не опр.              | 0.0003    | 0.0069              |
| Торит                      | $14 \cdot 10^{-6}$   | $9 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | $5 \cdot 10^{-5}$   |
| Силлиманит                 | 0.024                | 0.0033            | Не опр.               | 0.02                 | Не опр.   | 0.0082              |
| Андалузит                  | $4 \cdot 10^{-5}$    | 0.0008            | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.0004              |
| Дистен                     | 0.002                | 0.004             | Не опр.               | 0.045                | Не опр.   | 0.0033              |
| Топаз                      | $7 \cdot 10^{-8}$    | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | $2 \cdot 10^{-8}$   |
| Ставролит                  | 0.007                | 0.01              | Не опр.               | 0.025                | 0.0001    | 0.0074              |
| Титанит                    | 0.05                 | 0.032             | 0.02                  | 0.016                | Не опр.   | 0.034               |
| Лейкоксен                  | 0.15                 | 0.016             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.047               |
| Эпидот                     | 0.3                  | 0.01              | Не опр.               | 1.8                  | Не опр.   | 0.11                |
| Клиноцоизит                | 0.002                | 0.05              | 0.01                  | 0.006                | Не опр.   | 0.029               |
| Везувиан                   | Не опр.              | Не опр.           | 0.1                   | 0.2                  | Не опр.   | 0.023               |
| Ортит                      | $7 \cdot 10^{-8}$    | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | $18 \cdot 10^{-9}$  |
| <i>Кольцевые силикаты</i>  |                      |                   |                       |                      |           |                     |
| Берилл                     | $1.5 \cdot 10^{-5}$  | Не опр.           | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | $3.8 \cdot 10^{-6}$ |
| Турмалин                   | 0.023                | 0.0066            | $1.2 \cdot 10^{-4}$   | 0.012                | 0.0001    | 0.0096              |
| <i>Цепочечные силикаты</i> |                      |                   |                       |                      |           |                     |
| Диопсид                    | Не опр.              | Не опр.           | 0.2                   | Не опр.              | Не опр.   | 0.039               |
| Авгит                      | 0.025                | 0.002             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.0074              |
| Гиперстен                  | 0.001                | 0.001             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.0008              |
| Тремолит                   | Не опр.              | 0.023             | 0.8                   | Не опр.              | Не опр.   | 0.17                |
| Актинолит                  | $4 \cdot 10^{-5}$    | 0.0006            | 0.2                   | Не опр.              | Не опр.   | 0.039               |
| Арфведсонит                | Не опр.              | 0.017             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.0089              |
| Роговая обманка            | 0.5                  | 0.8               | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.55                |
| <i>Слоистые силикаты</i>   |                      |                   |                       |                      |           |                     |
| Тальк                      | Не опр.              | 0.005             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.0026              |
| Пирофиллит                 | Не опр.              | 0.01              | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.0052              |
| Парагонит                  | 1                    | 1                 | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.78                |

| Минералы                      | Песчаники<br>и пески | Глины<br>и сланцы | Карбонатные<br>породы | Кремнистые<br>породы | Эвапориты | Осадочные<br>породы |
|-------------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------|---------------------|
| Мусковит                      | 0.2                  | 6.4               | 0.02                  | Не опр.              | 0.0001    | 3.39                |
| Глауконит                     | 1.5                  | 0.3               | 0.001                 | 5.9                  | 0.0001    | 0.64                |
| Биотит                        | 3                    | 5                 | 1                     | Не опр.              | 0.01      | 3.57                |
| Гидромусковит                 | 9.5                  | 18.3              | 2.3                   | 5.3                  | 0.05      | 12.51               |
| Гидробиотит                   | 3                    | 3                 | 0.3                   | Не опр.              | 0.04      | 2.39                |
| Монтморилло-<br>нит           | 2                    | 3                 | 0.5                   | 0.3                  | Не опр.   | 2.18                |
| Бейделлит                     | 1                    | 1                 | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.78                |
| Нонтронит                     | 1.5                  | 4                 | 2                     | Не опр.              | Не опр.   | 2.86                |
| Вермикулит                    | 0.1                  | 0.5               | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.29                |
| Клинохлор                     | 0.5                  | 0.7               | 0.1                   | Не опр.              | 0.0001    | 0.51                |
| Рипидолит                     | 2                    | 2.7               | Не опр.               | 1                    | 0.1       | 1.94                |
| Шамозит                       | 2                    | 4                 | 0.5                   | 2.5                  | 0.1       | 2.74                |
| Хлоритоид                     | Не опр.              | 0.003             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.0016              |
| Каолинит                      | 0.7                  | 2                 | 0.3                   | Не опр.              | Не опр.   | 1.28                |
| <i>Каркасные силикаты</i>     |                      |                   |                       |                      |           |                     |
| Анортит                       | Не опр.              | Не опр.           | 0.01                  | Не опр.              | Не опр.   | 0.0019              |
| Битовнит                      | Не опр.              | 0.2               | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.1                 |
| Лабрадор                      | 1                    | 0.7               | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.62                |
| Андезин                       | 2.5                  | 2                 | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 1.68                |
| Олигоклаз                     | 5.5                  | 4                 | 0.01                  | 1                    | 0.001     | 3.51                |
| Альбит                        | 5                    | 2.7               | 0.45                  | 1.8                  | Не опр.   | 2.8                 |
| КПШ                           | 6                    | 4.9               | 2                     | 2                    | Не опр.   | 4.51                |
| Натролит                      | 1                    | Не опр.           | 0.9                   | 0.3                  | Не опр.   | 0.43                |
| <i>Неминеральные вещества</i> |                      |                   |                       |                      |           |                     |
| Стекло кислое                 | 0.002                | 0.002             | Не опр.               | Не опр.              | Не опр.   | 0.002               |
| С <sub>орг.</sub>             | 0.28                 | 0.8               | 0.36                  | 0.48                 | Не опр.   | 0.57                |

цессе выветривания эндогенных минералов. Оно свидетельствует о том, что не меньше 20% масс континентальных осадочных пород представлено продуктами древнейшей гидросферы – веществами, которые с древнейших времен циркулируют между земной поверхностью, биосферой, гидросферой и атмосферой.

Минералы, являющиеся традиционными источниками химических элементов (кроме О и Si) и их соединений, составляют около 21.651% масс осадочных пород. В том числе, %: самородные элементы – 0.08, сульфиды – 0.1, галогениды (в основном галит) – 0.96, оксиды – 0.26, гидроксиды – 0.75, карбонаты (в основном кальцит) – 19.06, сульфаты – 0.36, фосфаты (в основном апатит) – 0.055, силикаты редких элементов (в основном циркон) – 0.026%. Но еще почти 20% масс осадочных пород представлено такими перспективными для крупномасштабного освоения минералами, как шамозит, каолинит, глауконит, смектиты, вермикулит, мусковит, калиевые шпаты. Суммарное содержание реакционноспособных минералов (самородная се-

ра, сульфиды, галогениды, карбонаты, сульфаты, фосфаты) и органических соединений в осадочных породах – около 21.5%. Суммарное содержание минералов, опасных в экологическом отношении (сульфиды, галогениды, сульфаты, и др.), около 1.5%, а минералов наиболее токсичных элементов (Hg, Pb, As, Cr, Th) – около 0.0002%.

### **Вулканиды**

Четвертичные вулканиды Камчатки и Курильских островов (Ермаков, 1977; Максимов, Иванов, 1986); четвертичные базальты Нью-Мексико и Юты (Hoffer, 1971; Condil, Barsky, 1972); палеогеновые липариты, дациты, трахилипариты, андезиты, андезито-базальты и базальты Армении (Држбашян, 1965); липариты Северного Кавказа (Ляхович, 1963); кайнозойские и мезозойские эффузивные породы монголо-охотского пояса (Антипин и др., 1982); меловые липариты, липарит-дацитовые порфириды, андезитовые порфиры, базальтовые, диабазовые и долеритовые порфириды Северной Армении (Мнацаканян, 1965); меловые липарито-дациты охотско-чукотского пояса (Ичетовкин, 1978); триасовые липариты и плагиолипариты Зауралья (Иванов, 1974); триасовые и пермские траппы Сибири (Альмухамедов, 1967; Дмитриев, 1959; Минералогия траппов..., 1975; Наумов, Гурин, 1967); плагиолипаритовые туфы Закарпатского прогиба (Баталин и др., 1975); кайнотипные франкские перлиты и липариты Северного Урала (Язева, 1973).

В составе вулканогенных пород (табл. 1.10) эндогенных минералов – 89.79%, неминеральных веществ – 9.73. Суммарное содержание минералов, являющихся традиционными источниками наиболее ценных элементов – 2.6, реакционноспособных минералов (сульфиды, карбонаты, сульфаты, фосфаты) – 1.53, минералов, опасных в экологическом отношении, около 0.1, минералов наиболее токсичных элементов – около  $5 \cdot 10^{-5}$  %.

### **1.2.3. Средний минеральный состав горных пород гранитно-гнейсового слоя**

В состав гранитно-гнейсового слоя А.Б. Роновым с соавторами (1990) включены метаморфические и магматические породы нижнепротерозойского и архейского возраста Русской платформы, Канадского, Австралийского, Алданского, Южно-Африканского, Бразильского, Гвианского щитов. Правильнее было бы включать в гранитно-гнейсовый слой также и более молодые магматические и метаморфические породы (Лутц, 1975). Этим руководствовался и автор при подборе исходных данных. Вместе с тем автор предполагал, что установленные А.Б. Роновым и др. (1990) соотношения масс горных пород близки к фактическим. Значимость отмеченного недостатка может быть установлена только после разработки более корректной модели земной коры.

Доли масс горных пород в гранитно-гнейсовом слое, %: граниты – 10.75, гранодиориты – 4.43, базиты – 1.96, сиениты – 0.07, ультрабазиты – 0.07, метапесчаники – 3.82, парагнейсы и парасланцы – 40.01, метакарбонатные породы – 1.48, железистые породы – 0.5, гранито-гнейсы – 30.39, метариолиты – 0.86, метаандезиты – 1.35, metabазиты – 4.31.



Таблица 1.10

**Среднее содержание минералов (%) в вулканитах осадочного слоя  
континентальной коры**

| Минералы                   | Кислые              | Средние             | Основные            | В целом              |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| <i>Самородные элементы</i> |                     |                     |                     |                      |
| Медь                       | $2 \cdot 10^{-6}$   | $8 \cdot 10^{-6}$   | $8 \cdot 10^{-6}$   | $7.3 \cdot 10^{-6}$  |
| Серебро                    | $8.3 \cdot 10^{-8}$ | $1 \cdot 10^{-7}$   | $3.3 \cdot 10^{-8}$ | $6 \cdot 10^{-8}$    |
| Золото                     | $1 \cdot 10^{-10}$  | Не опр.             | Не опр.             | $1.2 \cdot 10^{-11}$ |
| Свинец                     | $2 \cdot 10^{-6}$   | $1 \cdot 10^{-6}$   | $3 \cdot 10^{-7}$   | $7.2 \cdot 10^{-7}$  |
| Цинк                       | $1 \cdot 10^{-6}$   | $2 \cdot 10^{-6}$   | $6 \cdot 10^{-7}$   | $1.1 \cdot 10^{-6}$  |
| <i>Сульфиды</i>            |                     |                     |                     |                      |
| Халькозин                  | $3 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.             | Не опр.             | $3.6 \cdot 10^{-6}$  |
| Борнит                     | Не опр.             | Не опр.             | 0.0001              | $5.7 \cdot 10^{-5}$  |
| Акантит                    | $2.9 \cdot 10^{-8}$ | $3.5 \cdot 10^{-8}$ | $1 \cdot 10^{-8}$   | $2 \cdot 10^{-8}$    |
| Аргентит                   | $5.4 \cdot 10^{-8}$ | $6.6 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-8}$   | $3.8 \cdot 10^{-8}$  |
| Пентландит                 | Не опр.             | Не опр.             | 0.0001              | $5.7 \cdot 10^{-5}$  |
| Сфалерит                   | $6 \cdot 10^{-5}$   | $6 \cdot 10^{-5}$   | $1.5 \cdot 10^{-4}$ | $1.1 \cdot 10^{-4}$  |
| Халькопирит                | 0.0003              | 0.001               | 0.001               | 0.001                |
| Тетраэдрит                 | $4.2 \cdot 10^{-8}$ | $5.1 \cdot 10^{-8}$ | $1.6 \cdot 10^{-8}$ | $3 \cdot 10^{-8}$    |
| Фрейбергит                 | $2.9 \cdot 10^{-8}$ | $3.5 \cdot 10^{-8}$ | $1 \cdot 10^{-8}$   | $2 \cdot 10^{-8}$    |
| Кубанит                    | $1 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | 0.0003              | $1.7 \cdot 10^{-4}$  |
| Пирротин                   | Не опр.             | $2 \cdot 10^{-6}$   | 0.05                | 0.029                |
| Галенит                    | 0.0002              | $1.5 \cdot 10^{-4}$ | $7 \cdot 10^{-5}$   | $1.1 \cdot 10^{-4}$  |
| Киноварь                   | $1 \cdot 10^{-6}$   | $1 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | $4.3 \cdot 10^{-7}$  |
| Ковеллин                   | $3 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.             | Не опр.             | $3.6 \cdot 10^{-6}$  |
| Стефанит                   | $2.6 \cdot 10^{-8}$ | $3 \cdot 10^{-8}$   | $1 \cdot 10^{-8}$   | $1.8 \cdot 10^{-8}$  |
| Пираргирит                 | $5.8 \cdot 10^{-8}$ | $7 \cdot 10^{-8}$   | $2.2 \cdot 10^{-8}$ | $4.1 \cdot 10^{-8}$  |
| Пирит                      | 0.05                | 0.07                | 0.05                | 0.056                |
| Арсенопирит                | 0.0001              | $1 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | $1.2 \cdot 10^{-5}$  |
| Молибденит                 | $4 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.             | Не опр.             | $4.8 \cdot 10^{-6}$  |
| Реальгар                   | $1.5 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-5}$   | $5 \cdot 10^{-6}$   | $7.7 \cdot 10^{-6}$  |
| Аурипигмент                | $5 \cdot 10^{-5}$   | $2.5 \cdot 10^{-5}$ | $5 \cdot 10^{-6}$   | $1.7 \cdot 10^{-5}$  |
| <i>Галогениды</i>          |                     |                     |                     |                      |
| Флюорит                    | 0.0008              | Не опр.             | Не опр.             | 0.0001               |
| <i>Оксиды</i>              |                     |                     |                     |                      |
| Шпинель                    | Не опр.             | Не опр.             | $2.7 \cdot 10^{-4}$ | $1.5 \cdot 10^{-4}$  |
| Магнетит                   | 0.35                | 0.84                | 0.62                | 0.66                 |
| Ti-магнетит                | 0.01                | 0.5                 | 1.4                 | 0.96                 |
| Хромит                     | Не опр.             | $7 \cdot 10^{-5}$   | $4 \cdot 10^{-4}$   | $2.5 \cdot 10^{-4}$  |
| Иоцит                      | Не опр.             | 0.0001              | $1 \cdot 10^{-5}$   | $4 \cdot 10^{-5}$    |
| Корунд                     | $1 \cdot 10^{-6}$   | $5 \cdot 10^{-5}$   | $2 \cdot 10^{-5}$   | $2.7 \cdot 10^{-5}$  |
| Гематит                    | 0.02                | 0.6                 | 0.2                 | 0.3                  |
| Ильменит                   | 0.03                | 0.49                | 0.7                 | 0.56                 |
| Кварц                      | 31.6                | 8.8                 | 0.2                 | 6.6                  |
| Тридимит                   | 0.15                | Не опр.             | Не опр.             | 0.018                |

Продолжение табл. 1.10

| Минералы                      | Кислые            | Средние             | Основные            | В целом             |
|-------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Кристобалит                   | 0.05              | Не опр.             | 0.05                | 0.03                |
| Опал                          | 0.2               | Не опр.             | 0.05                | 0.053               |
| Рутил                         | $8 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$   | $1.5 \cdot 10^{-4}$ | $2.4 \cdot 10^{-4}$ |
| Анализ                        | $1 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.             | $1.2 \cdot 10^{-5}$ |
| Уранинит                      | $5 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.             | Не опр.             | $6 \cdot 10^{-6}$   |
| <i>Гидроксиды</i>             |                   |                     |                     |                     |
| Бехоит                        | $4 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.             | Не опр.             | $4.8 \cdot 10^{-7}$ |
| Гетит                         | 0.0007            | 0.003               | 0.0005              | 0.0013              |
| <i>Карбонаты</i>              |                   |                     |                     |                     |
| Смитсонит                     | $5 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.             | $7 \cdot 10^{-7}$   | $1 \cdot 10^{-6}$   |
| Сидерит                       | 0.75              | 0.96                | 1.2                 | 1.07                |
| Кальцит                       | 0.83              | 0.2                 | 0.3                 | 0.33                |
| Доломит                       | Не опр.           | Не опр.             | 0.1                 | 0.057               |
| Церуссит                      | $5 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.             | $3 \cdot 10^{-6}$   | $8 \cdot 10^{-6}$   |
| Азурит                        | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$   | $1 \cdot 10^{-4}$   | $7 \cdot 10^{-5}$   |
| Малахит                       | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-5}$   | $5 \cdot 10^{-5}$   | $3.7 \cdot 10^{-5}$ |
| Досонит                       | 0.005             | Не опр.             | Не опр.             | 0.0006              |
| <i>Сульфаты и вольфраматы</i> |                   |                     |                     |                     |
| Барит                         | 0.003             | 0.003               | Не опр.             | 0.0013              |
| Шеелит                        | $3 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.             | Не опр.             | $3.6 \cdot 10^{-6}$ |
| <i>Фосфаты</i>                |                   |                     |                     |                     |
| Ксенотим                      | $3 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.             | Не опр.             | $3.6 \cdot 10^{-6}$ |
| Монацит                       | 0.001             | Не опр.             | Не опр.             | $1.2 \cdot 10^{-4}$ |
| Апатит                        | 0.011             | 0.03                | 0.01                | 0.016               |
| <i>Островные силикаты</i>     |                   |                     |                     |                     |
| Оливин                        | 0.005             | 0.005               | 0.5                 | 0.29                |
| Фаялит                        | 0.005             | Не опр.             | Не опр.             | 0.0006              |
| Альмандин                     | 0.002             | 0.0002              | $1 \cdot 10^{-6}$   | 0.0003              |
| Спессартин                    | 0.0002            | Не опр.             | Не опр.             | $2 \cdot 10^{-5}$   |
| Циркон                        | 0.011             | 0.0035              | 0.0022              | 0.0037              |
| Циртолит                      | 0.0001            | Не опр.             | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-5}$   |
| Торит                         | $5 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.             | Не опр.             | $6 \cdot 10^{-6}$   |
| Топаз                         | $1 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.             | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-5}$   |
| Гадолинит                     | Не опр.           | $1 \cdot 10^{-9}$   | Не опр.             | $3 \cdot 10^{-10}$  |
| Титанит                       | 0.001             | 0.0005              | 0.0004              | 0.0005              |
| Лейкоксен                     | 0.002             | 0.006               | 0.001               | 0.0027              |
| Берtrandит                    | $9 \cdot 10^{-6}$ | $1.5 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.             | $1.5 \cdot 10^{-6}$ |
| Эпидот                        | 0.05              | 0.4                 | 0.5                 | 0.42                |
| Цоизит                        | 0.0001            | Не опр.             | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-5}$   |
| Ортит                         | 0.003             | 0.0001              | Не опр.             | 0.0004              |
| Пренит                        | Не опр.           | Не опр.             | 0.1                 | 0.057               |

| Минералы                      | Кислые            | Средние             | Основные | В целом             |
|-------------------------------|-------------------|---------------------|----------|---------------------|
| <i>Кольцевые силикаты</i>     |                   |                     |          |                     |
| Берилл                        | $9 \cdot 10^{-6}$ | $1.2 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.  | $1.4 \cdot 10^{-6}$ |
| Кордиерит                     | $1 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-4}$   | Не опр.  | $4 \cdot 10^{-5}$   |
| Турмалин                      | $3 \cdot 10^{-5}$ | $5 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.  | $2 \cdot 10^{-5}$   |
| <i>Цепочечные силикаты</i>    |                   |                     |          |                     |
| Пижонит                       | Не опр.           | 0.5                 | 3        | 1.87                |
| Диопсид                       | 0.01              | 0.9                 | 4        | 2.6                 |
| Сподумен                      | $5 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.  | $2.1 \cdot 10^{-6}$ |
| Эгирин                        | 0.1               | 0.01                | 1        | 0.59                |
| Авгит                         | 0.02              | 4                   | 14       | 9.26                |
| Энстатит                      | 0.001             | 0.8                 | 1.1      | 0.88                |
| Бронзит                       | 0.001             | 0.03                | 0.012    | 0.016               |
| Гиперстен                     | 0.01              | 1.5                 | 7        | 4.48                |
| Тремолит                      | Не опр.           | 0.03                | Не опр.  | 0.009               |
| Актинолит                     | 0.03              | 0.2                 | 0.2      | 0.18                |
| Рибекит                       | 0.1               | 0.01                | 0.01     | 0.021               |
| Арфведсонит                   | 0.1               | 0.01                | 0.01     | 0.021               |
| Глаукофан                     | 0.005             | Не опр.             | Не опр.  | 0.0006              |
| Роговая обманка               | 0.1               | 6                   | 3.5      | 3.86                |
| <i>Слоистые силикаты</i>      |                   |                     |          |                     |
| Мусковит                      | 4.7               | 0.5                 | Не опр.  | 0.72                |
| Биотит                        | 2.4               | 5.5                 | 7.3      | 6.16                |
| Рипидолит                     | 0.01              | 0.2                 | 0.3      | 0.25                |
| Тюрингит                      | 0.3               | 1.2                 | 0.6      | 0.75                |
| Клементит                     | Не опр.           | Не опр.             | 0.2      | 0.11                |
| Серпентин                     | Не опр.           | 0.05                | Не опр.  | 0.015               |
| <i>Каркасные силикаты</i>     |                   |                     |          |                     |
| Анальцим                      | 0.1               | Не опр.             | 0.3      | 0.18                |
| Анортит                       | Не опр.           | 0.2                 | 1        | 0.63                |
| Битовнит                      | Не опр.           | 0.8                 | 4        | 2.5                 |
| Лабрадор                      | 0.03              | 13.5                | 27.5     | 19.91               |
| Андезин                       | 0.3               | 17.5                | 9        | 10.57               |
| Олигоклаз                     | 2.5               | 9.3                 | 0.7      | 3.56                |
| Альбит                        | 17                | 4                   | 0.7      | 3.66                |
| КПШ                           | 16                | 6                   | Не опр.  | 3.76                |
| Санидин                       | 14                | Не опр.             | Не опр.  | 1.67                |
| Натролит                      | 0.1               | Не опр.             | 0.04     | 0.035               |
| Томсонит                      | Не опр.           | Не опр.             | 0.01     | 0.006               |
| <i>Неминеральные вещества</i> |                   |                     |          |                     |
| Палагонит                     | 0.12              | Не опр.             | 0.8      | 0.47                |
| Стекло основное               | Не опр.           | 14                  | 7.2      | 8.42                |
| Стекло кислое                 | 7                 | Не опр.             | Не опр.  | 0.84                |

### **Магматические породы.**

При расчетах использованы преимущественно результаты количественных минералогических анализов горных пород, перечисленных ниже.

*Граниты.* Биотитовые граниты ряда массивов СССР (Ляхович, 1967); меловые и третичные плагиограниты Армении (Бартикян, 1968); позднегерцинские граниты Центрального Казахстана (Серых и др., 1969); палеозойские граниты Северного Тянь-Шаня (Туровский, Кокарев, 1968); палеозойские граниты Среднего и Южного Урала (Бушляков, Соболев, 1976; Чашухина, 1991; Чашухина и др., 1989); докембрийские граниты Приполярного Урала (Вигорова, 1973; Вигорова, Покровский, 1973); граниты Джорджии, Северной Калифорнии, Каскадных гор (Wright, 1966; Lipman, 1963; Erikson, 1969); адаметеллиты, граниты Венесуэлы (Kalliokoski, 1965; Kovisaris, 1971); докембрийские граниты Нью-Джерси (Young, 1971).

*Диориты.* Диориты, гранодиориты ряда массивов в СССР (Ляхович, 1968); меловые и третичные плагиопорфиры, кварцевые плагиопорфиры Армении (Бартикян, 1968); позднегерцинские гранодиориты Центрального Казахстана (Серых и др., 1969); палеозойские диориты, плагиограниты, гранодиориты Северного Тянь-Шаня (Туровский, Кокарев, 1968); палеозойские гранитоиды повышенной основности Среднего и Южного Урала (Бушляков, Соболев, 1976; Чашухина, 1991; Чашухина и др., 1989); докембрийские гранитоиды повышенной основности Приполярного Урала (Вигорова, 1991; Вигорова, Покровский, 1973); диориты, тоналиты, плагиограниты Джорджии, Северной Калифорнии, Каскадных гор (Wright, 1966; Lipman, 1963; Erikson, 1969); гранодиориты Венесуэлы (Kalliokoski, 1965; Kovisaris, 1971).

*Базиты.* Уральские габбро, габбро-нориты, габбро-диабазы и ассоциирующие с ними диабазы (Сазонов, 1989; Соболев, 1968; Фишман и др., 1968; Фоминых, 1991); метасоматически измененные габброиды Бельтауского массива в Западном Узбекистане (Кромская, 1973); лейкогаббро Северного Казахстана (Спирidonов, 1960); габброиды США (Lipman, 1963; Erikson, 1969).

*Сиениты.* Пермские сиениты, нефелиновые сиениты, щелочные граниты Северного Тянь-Шаня (Туровский, Кокарев, 1968); сиениты, нефелиновые сиениты, фениты Вишневых гор на Среднем Урале (Еськова и др., 1964); сиениты и граносиениты Северной Киргизии (Леонова, Погиблова, 1961); сиениты кембро-рифейских комплексов Северного Тимана (Фишман и др., 1968); ордовикские нефелиновые сиениты и докембрийские сиениты Нью-Джерси (Young, 1971; Махеу, 1976); сиениты, нефелиновые сиениты, щелочные граниты Кольского полуострова (Батиева, Бельков, 1984, 1985; Бельков, Батиева, 1988; Зубарев, 1978; Кузнецова, 1976).

*Ультрабазиты.* Дуниты Южной Якутии (Разин и др., 1965); дуниты, пироксениты, клинопироксениты, гарцбургиты, перидотиты, серпентиниты Урала (Борисенко, Сердобова, 1965; Сазонов, 1989; Соболев, 1968; Фишман и др., 1968; Фоминых, 1991).

Результаты расчетов приведены в табл. 1.11. Минералы, являющиеся традиционными источниками химических элементов (кроме O и Si) и их соединений, составляют около 2 % массы совокупности магматических

Таблица 1.11

**Среднее содержание минералов (%) в магматических породах  
гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы                   | Граниты             | Гранодиориты        | Базиты              | Сиениты            | Ультрабазиты       | Магматические породы в целом |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| <i>Самородные элементы</i> |                     |                     |                     |                    |                    |                              |
| Медь                       | $37 \cdot 10^{-8}$  | $2 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | $75 \cdot 10^{-8}$           |
| Серебро                    | $5.2 \cdot 10^{-8}$ | $8.1 \cdot 10^{-8}$ | $4.4 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $5.8 \cdot 10^{-8}$          |
| Золото                     | $4.2 \cdot 10^{-8}$ | $5.7 \cdot 10^{-8}$ | $7 \cdot 10^{-9}$   | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-9}$  | $4.2 \cdot 10^{-8}$          |
| Свинец                     | $15 \cdot 10^{-8}$  | $7 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.             | $2 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | $28 \cdot 10^{-8}$           |
| Поликсен                   | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | $6 \cdot 10^{-7}$  | $23 \cdot 10^{-10}$          |
| Иг-платина                 | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | $6 \cdot 10^{-7}$  | $23 \cdot 10^{-10}$          |
| Цинк                       | Не опр.             | $2 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $5 \cdot 10^{-8}$            |
| Олово                      | $9 \cdot 10^{-9}$   | $23 \cdot 10^{-8}$  | Не опр.             | $3 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.            | $66 \cdot 10^{-9}$           |
| Висмут                     | $73 \cdot 10^{-9}$  | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $45 \cdot 10^{-9}$           |
| Муассанит                  | $3 \cdot 10^{-6}$   | $8 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $4 \cdot 10^{-6}$            |
| <i>Сульфиды</i>            |                     |                     |                     |                    |                    |                              |
| Тетрадимит                 | $2 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $12 \cdot 10^{-8}$           |
| Халькозин                  | —                   | $2 \cdot 10^{-8}$   | $1 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-6}$  | $12 \cdot 10^{-8}$           |
| Борнит                     | $13 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-6}$  | $8 \cdot 10^{-7}$            |
| Акантит                    | $1.9 \cdot 10^{-8}$ | $2.8 \cdot 10^{-8}$ | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $2.1 \cdot 10^{-8}$          |
| Аргентит                   | $3.4 \cdot 10^{-8}$ | $5.3 \cdot 10^{-8}$ | $3 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр.            | $3.8 \cdot 10^{-8}$          |
| Пентландит                 | Не опр.             | Не опр.             | 0.004               | Не опр.            | 0.0003             | 0.0004                       |
| Сфалерит                   | $35 \cdot 10^{-6}$  | $2 \cdot 10^{-4}$   | $1.8 \cdot 10^{-5}$ | $3 \cdot 10^{-6}$  | $6 \cdot 10^{-6}$  | $7.5 \cdot 10^{-5}$          |
| Метацинна-барит            | $1 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $6 \cdot 10^{-9}$            |
| Халькопирит                | $12 \cdot 10^{-5}$  | $8 \cdot 10^{-5}$   | 0.0025              | $27 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-5}$  | $3.8 \cdot 10^{-4}$          |
| Тетраэдрит                 | $2.6 \cdot 10^{-8}$ | $4 \cdot 10^{-8}$   | $2 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр.            | $2.9 \cdot 10^{-8}$          |
| Фрейбергит                 | $1.9 \cdot 10^{-8}$ | $2.8 \cdot 10^{-8}$ | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $2.1 \cdot 10^{-8}$          |
| Пирротин                   | 0.006               | 0.014               | 0.02                | 0.02               | 0.002              | 0.0096                       |
| Троилит                    | Не опр.             | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-5}$   | $1 \cdot 10^{-4}$  | Не опр.            | $15 \cdot 10^{-7}$           |
| Галенит                    | $23 \cdot 10^{-6}$  | 0.0002              | $6 \cdot 10^{-6}$   | $25 \cdot 10^{-6}$ | $36 \cdot 10^{-7}$ | $66 \cdot 10^{-6}$           |
| Киноварь                   | $4 \cdot 10^{-8}$   | $3 \cdot 10^{-7}$   | $1 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-7}$  | $1.1 \cdot 10^{-7}$          |
| Ковеллин                   | $7 \cdot 10^{-7}$   | $2 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $95 \cdot 10^{-8}$           |
| Куперит                    | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | $6 \cdot 10^{-7}$  | $23 \cdot 10^{-10}$          |
| Антимонит                  | $5 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $3 \cdot 10^{-8}$            |
| Висмутин                   | $1 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.            | $6 \cdot 10^{-7}$            |
| Стефанит                   | $1.6 \cdot 10^{-8}$ | $2.5 \cdot 10^{-8}$ | $1.4 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $1.8 \cdot 10^{-8}$          |
| Буланжерит                 | $5 \cdot 10^{-9}$   | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $3 \cdot 10^{-9}$            |
| Пираргирит                 | $3.8 \cdot 10^{-8}$ | $5.6 \cdot 10^{-8}$ | $3.1 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $4.2 \cdot 10^{-8}$          |
| Пирит                      | 0.02                | 0.02                | 0.05                | 0.01               | 0.1                | 0.024                        |
| Марказит                   | $44 \cdot 10^{-5}$  | 0.0058              | Не опр.             | 0.0005             | Не опр.            | 0.0018                       |
| Леллингит                  | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | $3.8 \cdot 10^{-9}$          |
| Кобальтин                  | $1 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.             | $4 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.            | Не опр.            | $6.3 \cdot 10^{-6}$          |
| Арсенопирит                | $56 \cdot 10^{-6}$  | $4 \cdot 10^{-5}$   | $2 \cdot 10^{-6}$   | $4 \cdot 10^{-6}$  | $6 \cdot 10^{-7}$  | $4.4 \cdot 10^{-5}$          |
| Молибденит                 | $3 \cdot 10^{-5}$   | $4 \cdot 10^{-5}$   | $9.3 \cdot 10^{-6}$ | $3 \cdot 10^{-6}$  | $2 \cdot 10^{-6}$  | $6.3 \cdot 10^{-5}$          |
| Реальгар                   | $45 \cdot 10^{-10}$ | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $28 \cdot 10^{-10}$          |
| Аурипигмент                | $23 \cdot 10^{-9}$  | $68 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $18 \cdot 10^{-7}$           |

Продолжение табл. 1.11

| Минералы          | Граниты             | Гранодиориты       | Базиты            | Сиениты            | Ультрабазиты       | Магматические породы в целом |
|-------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| <i>Галогениды</i> |                     |                    |                   |                    |                    |                              |
| Флюорит           | 0.006               | $45 \cdot 10^{-5}$ | $4 \cdot 10^{-6}$ | 0.047              | Не опр.            | 0.004                        |
| <i>Оксиды</i>     |                     |                    |                   |                    |                    |                              |
| Шпинель           | $4 \cdot 10^{-6}$   | $1 \cdot 10^{-6}$  | $1 \cdot 10^5$    | Не опр.            | Не опр.            | $3.9 \cdot 10^{-6}$          |
| Плеонаст          | Не опр.             | Не опр.            | $6 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.            | 0.02               | $83 \cdot 10^{-6}$           |
| Магнетит          | 0.85                | 0.95               | 2.7               | 0.43               | 6.4                | 1.11                         |
| Ti-магнетит       | 0.0002              | Не опр.            | 2                 | 0.013              | 1.5                | 0.23                         |
| Хромит            | —                   | $6 \cdot 10^{-6}$  | 0.0029            | Не опр.            | 0.2                | 0.0011                       |
| Хризоберилл       | $4.5 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.            | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $2.8 \cdot 10^{-5}$          |
| Корунд            | $45 \cdot 10^{-6}$  | $5 \cdot 10^{-5}$  | $5 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.            | Не опр.            | $41 \cdot 10^{-6}$           |
| Гематит           | 0.01                | 0.03               | 0.3               | 0.0001             | Не опр.            | 0.048                        |
| Ильменит          | 0.24                | 0.5                | 0.5               | 0.4                | 0.07               | 0.34                         |
| Перовскит         | $3 \cdot 10^{-6}$   | $1 \cdot 10^{-5}$  | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $44 \cdot 10^{-7}$           |
| Лопарит           | $18 \cdot 10^{-7}$  | $6 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.           | 0.0017             | Не опр.            | $77 \cdot 10^{-7}$           |
| Пироклор          | $5 \cdot 10^{-6}$   | $2 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.           | $1 \cdot 10^{-4}$  | Не опр.            | $4 \cdot 10^{-6}$            |
| Микролит          | $1 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.            | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $6 \cdot 10^{-8}$            |
| Кварц             | 31                  | 21                 | 6.1               | 4.5                | Не опр.            | 25.39                        |
| Пирролюзит        | $22 \cdot 10^{-7}$  | $13 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $47 \cdot 10^{-7}$           |
| Рутил             | 0.0005              | 0.0016             | 0.027             | $13 \cdot 10^{-6}$ | 0.0004             | 0.0038                       |
| Касситерит        | $15 \cdot 10^{-6}$  | $4 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.           | $35 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-5}$            |
| Ильменорутил      | 0.0003              | $18 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $19 \cdot 10^{-5}$           |
| Псиломелан        | $12 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | Не опр.           | Не опр.            | $75 \cdot 10^{-7}$ | $7.5 \cdot 10^{-6}$          |
| Анатаз            | 0.0005              | $34 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.           | $2 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | 0.0004                       |
| Брукит            | $6 \cdot 10^{-6}$   | $3 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.           | $2 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.            | $38 \cdot 10^{-7}$           |
| Колумбит          | $8 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.            | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $5 \cdot 10^{-5}$            |
| Танталит          | $3 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.            | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $2 \cdot 10^{-6}$            |
| Делоренцит        | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.           | $13 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.            | $5 \cdot 10^{-8}$            |
| Поликраз          | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.           | $8 \cdot 10^{-8}$  | Не опр.            | $3 \cdot 10^{-10}$           |
| Эвксенит          | $8 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.            | Не опр.           | $8 \cdot 10^{-8}$  | Не опр.            | $5 \cdot 10^{-5}$            |
| Бломстрандин      | $87 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.            | Не опр.           | $33 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.            | $67 \cdot 10^{-7}$           |
| Фергусонит        | $15 \cdot 10^{-6}$  | $32 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.           | $38 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.            | $18 \cdot 10^{-6}$           |
| Торианит          | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.           | $68 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.            | $26 \cdot 10^{-8}$           |
| Уранинит          | $78 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $49 \cdot 10^{-6}$           |
| <i>Гидроксиды</i> |                     |                    |                   |                    |                    |                              |
| Брусит            | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.           | Не опр.            | 0.5                | 0.0019                       |
| Гетит             | 0.0063              | 0.003              | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | 0.0047                       |
| <i>Карбонаты</i>  |                     |                    |                   |                    |                    |                              |
| Магнезит          | —                   | —                  | Не опр.           | Не опр.            | 0.2                | $76 \cdot 10^{-5}$           |
| Сидерит           | $35 \cdot 10^{-7}$  | 0.02               | 0.2               | Не опр.            | 0.03               | 0.028                        |
| Кальцит           | 0.012               | 0.02               | 0.05              | 0.09               | 0.09               | 0.019                        |
| Стронцианит       | $9 \cdot 10^{-9}$   | $4 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $15 \cdot 10^{-7}$           |

Продолжение табл. 1.11

| Минералы                       | Граниты            | Гранодиориты        | Базиты            | Сиениты            | Ультрабазиты       | Магматические породы в целом |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| Церуссит                       | $5 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $3 \cdot 10^{-6}$            |
| Азурит                         | $13 \cdot 10^{-7}$ | $4 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $9 \cdot 10^{-7}$            |
| Малахит                        | $2 \cdot 10^{-6}$  | $5 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $14 \cdot 10^{-7}$           |
| Бастнезит                      | $47 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $29 \cdot 10^{-5}$           |
| Бисмутит                       | $1 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $6 \cdot 10^{-7}$            |
| <i>Сульфаты</i>                |                    |                     |                   |                    |                    |                              |
| Целестин                       | $4 \cdot 10^{-7}$  | $64 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $17 \cdot 10^{-6}$           |
| Англезит                       | $36 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $25 \cdot 10^{-7}$           |
| Барит                          | $1 \cdot 10^{-7}$  | $1 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.           | $6 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | $26 \cdot 10^{-7}$           |
| Алузит                         | $1 \cdot 10^{-7}$  | —                   | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $6 \cdot 10^{-8}$            |
| Ярозит                         | $7 \cdot 10^{-6}$  | $24 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $11 \cdot 10^{-6}$           |
| <i>Молибдаты и вольфраматы</i> |                    |                     |                   |                    |                    |                              |
| Вольфрамит                     | $1 \cdot 10^{-5}$  | $1 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $6 \cdot 10^{-6}$            |
| Повеллит                       | $5 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $3 \cdot 10^{-7}$            |
| Шеелит                         | $44 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.           | $16 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.            | $33 \cdot 10^{-6}$           |
| Вульфенит                      | $4 \cdot 10^{-8}$  | $2 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $3 \cdot 10^{-8}$            |
| <i>Фосфаты</i>                 |                    |                     |                   |                    |                    |                              |
| Ксенотим                       | $2 \cdot 10^{-4}$  | $3 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.           | $27 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.            | $13 \cdot 10^{-5}$           |
| Монацит                        | 0.0043             | 0.0004              | Не опр.           | 0.0024             | Не опр.            | 0.0028                       |
| Рабдофан                       | $4 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $25 \cdot 10^{-7}$           |
| Амблигонит                     | $6 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $37 \cdot 10^{-8}$           |
| Апатит                         | 0.06               | 0.07                | 0.1               | 0.11               | 0.05               | 0.068                        |
| Карбонат-апатит                | $1 \cdot 10^{-6}$  | $12 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $3 \cdot 10^{-6}$            |
| Бритолит                       | Не опр.            | Не опр.             | Не опр.           | 0.0043             | Не опр.            | $16 \cdot 10^{-6}$           |
| Вивианит                       | $2 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-6}$            |
| Вейншенкит                     | $45 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $28 \cdot 10^{-8}$           |
| Метаторбернит                  | $9 \cdot 10^{-8}$  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $5.6 \cdot 10^{-8}$          |
| <i>Островные силикаты</i>      |                    |                     |                   |                    |                    |                              |
| Фенакит                        | $3 \cdot 10^{-5}$  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $1.9 \cdot 10^{-5}$          |
| Оливин                         | Не опр.            | Не опр.             | 0.2               | 0.01               | 12                 | 0.068                        |
| Альмандин                      | 0.04               | 0.012               | 0.007             | 0.0015             | $13 \cdot 10^{-6}$ | 0.029                        |
| Андрадит                       | Не опр.            | Не опр.             | $2 \cdot 10^{-7}$ | 0.001              | Не опр.            | $38 \cdot 10^{-7}$           |
| Циркон                         | 0.016              | 0.011               | 0.002             | 0.068              | $18 \cdot 10^{-6}$ | 0.013                        |
| Наэгит                         | $4 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $25 \cdot 10^{-8}$           |
| Циртолит                       | $15 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.           | 0.0009             | Не опр.            | $46 \cdot 10^{-7}$           |
| Торит                          | $14 \cdot 10^{-5}$ | 0.0004              | Не опр.           | 0.0007             | Не опр.            | $19 \cdot 10^{-5}$           |
| U-торит                        | $5 \cdot 10^{-7}$  | $1 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.           | $23 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.            | $65 \cdot 10^{-8}$           |
| Силлиманит                     | $1 \cdot 10^{-4}$  | $2.2 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $6.8 \cdot 10^{-5}$          |
| Андалузит                      | $2 \cdot 10^{-5}$  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.            | $12 \cdot 10^{-6}$           |
| Дистен                         | $7 \cdot 10^{-5}$  | $9 \cdot 10^{-5}$   | $1 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.            | Не опр.            | $67 \cdot 10^{-6}$           |

Продолжение табл. 1.11

| Минералы                   | Граниты             | Гранодиориты       | Базиты  | Сиениты             | Ультрабазиты      | Магматические породы в целом |
|----------------------------|---------------------|--------------------|---------|---------------------|-------------------|------------------------------|
| Топаз                      | $36 \cdot 10^{-6}$  | $34 \cdot 10^{-6}$ | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $31 \cdot 10^{-6}$           |
| Ставролит                  | $7 \cdot 10^{-5}$   | $21 \cdot 10^{-6}$ | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $49 \cdot 10^{-6}$           |
| Хондродит                  | $27 \cdot 10^{-5}$  | Не опр.            | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $17 \cdot 10^{-5}$           |
| Гадолинит                  | $5 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.            | Не опр. | $3 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.           | $3 \cdot 10^{-5}$            |
| Титанит                    | 0.12                | 0.2                | 0.27    | 0.58                | 0.0002            | 0.16                         |
| Лейкоксен                  | 0.0016              | 0.0006             | 0.0001  | 0.0004              | Не опр.           | 0.0012                       |
| Мурманит                   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | 0.033               | Не опр.           | $13 \cdot 10^{-5}$           |
| Дюмортьерит                | $1 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.            | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $6 \cdot 10^{-8}$            |
| Тортвейтит                 | $1 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.            | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $6 \cdot 10^{-8}$            |
| Иттриалит                  | 0.0002              | Не опр.            | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $12 \cdot 10^{-5}$           |
| Велерит                    | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | $1 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.           | $4 \cdot 10^{-10}$           |
| Ловенит                    | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | $5 \cdot 10^{-4}$   | Не опр.           | $19 \cdot 10^{-7}$           |
| Ринколит                   | $7 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $4 \cdot 10^{-8}$            |
| Лампрофиллит               | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | 0.01                | Не опр.           | $38 \cdot 10^{-6}$           |
| Бертрандит                 | $3 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.            | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $1.9 \cdot 10^{-5}$          |
| Клиноцоизит                | 0.015               | Не опр.            | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | 0.0093                       |
| Эпидот                     | 0.04                | 0.1                | 0.7     | Не опр.             | 1                 | 0.13                         |
| Ортит                      | 0.008               | 0.003              | Не опр. | 0.023               | Не опр.           | 0.0058                       |
| Чевкинит                   | $15 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.            | Не опр. | 0.0006              | Не опр.           | $32 \cdot 10^{-7}$           |
| Везувиан                   | $14 \cdot 10^{-8}$  | Не опр.            | Не опр. | 0.0015              | Не опр.           | $58 \cdot 10^{-7}$           |
| <i>Кольцевые силикаты</i>  |                     |                    |         |                     |                   |                              |
| Эвдиалит                   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | 0.023               | Не опр.           | $87 \cdot 10^{-6}$           |
| Нептунит                   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | 0.005               | Не опр.           | $19 \cdot 10^{-6}$           |
| Аксинит                    | $14 \cdot 10^{-5}$  | $1 \cdot 10^{-7}$  | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $87 \cdot 10^{-6}$           |
| Берилл                     | $2.2 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-7}$  | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $1.4 \cdot 10^{-4}$          |
| Нордит                     |                     |                    |         | $1.1 \cdot 10^{-4}$ |                   | $4.2 \cdot 10^{-7}$          |
| Турмалин                   | 0.003               | 0.002              | 0.001   | $13 \cdot 10^{-5}$  | $3 \cdot 10^{-5}$ | 0.0025                       |
| Хризоколла                 | $3 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $2 \cdot 10^{-8}$            |
| <i>Цепочечные силикаты</i> |                     |                    |         |                     |                   |                              |
| Диопсид                    | Не опр.             | Не опр.            | 8       | Не опр.             | 11                | 0.95                         |
| Салит                      | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | Не опр.             | 1                 | 0.0038                       |
| Сподумен                   | $87 \cdot 10^{-6}$  | $7 \cdot 10^{-5}$  | Не опр. | Не опр.             | Не опр.           | $72 \cdot 10^{-6}$           |
| Эгирин                     | Не опр.             | Не опр.            | 1.5     | 6                   | Не опр.           | 0.19                         |
| Омфациит                   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | 0.5                 | Не опр.           | 0.0019                       |
| Авгит                      | 0.1                 | 1.5                | 8.2     | 8.5                 | Не опр.           | 1.41                         |
| Энстатит                   | Не опр.             | Не опр.            | 0.2     | Не опр.             | 15                | 0.08                         |
| Бронзит                    | Не опр.             | Не опр.            | 2.5     | Не опр.             | 14                | 0.34                         |
| Гиперстен                  | 0.02                | 0.1                | 2.5     | Не опр.             | Не опр.           | 0.32                         |
| Рибекит                    | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | 0.3                 | Не опр.           | 0.0011                       |
| Арфведсонит                | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | 0.3                 | Не опр.           | 0.0012                       |
| Гастингсит                 | 0.07                | 0.1                | Не опр. | 0.77                | Не опр.           | 0.072                        |
| Роговая обманка            | 0.5                 | 3                  | 6.5     | 0.5                 | 4                 | 1.84                         |
| Энигматит                  | Не опр.             | Не опр.            | Не опр. | 0.23                | Не опр.           | $87 \cdot 10^{-5}$           |



| Минералы                  | Граниты             | Гранодиориты | Базиты  | Сиениты | Ультрабазиты | Магматические породы в целом |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------|---------|--------------|------------------------------|
| Волластонит               | $36 \cdot 10^{-9}$  | Не опр.      | Не опр. | Не опр. | Не опр.      | $22 \cdot 10^{-9}$           |
| Майзерит                  | $23 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.      | Не опр. | Не опр. | Не опр.      | $14 \cdot 10^{-7}$           |
| Рамзаит                   | Не опр.             | Не опр.      | Не опр. | 0.01    | Не опр.      | $38 \cdot 10^{-6}$           |
| <i>Слоистые силикаты</i>  |                     |              |         |         |              |                              |
| Тальк                     | Не опр.             | Не опр.      | Не опр. | Не опр. | 0.2          | $76 \cdot 10^{-5}$           |
| Мусковит                  | 0.3                 | 2.5          | 0.01    | 4       | Не опр.      | 0.84                         |
| Флогопит                  | Не опр.             | Не опр.      | Не опр. | 0.05    | 3            | 0.012                        |
| Биотит                    | 4.8                 | 8.75         | 5.3     | 1.5     | Не опр.      | 5.84                         |
| Лепидолит                 | $1.6 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.      | Не опр. | Не опр. | Не опр.      | $1 \cdot 10^{-5}$            |
| Циннвальдит               | $3 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.      | Не опр. | Не опр. | Не опр.      | $1.9 \cdot 10^{-5}$          |
| Протолитионит             | $2 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.      | Не опр. | Не опр. | Не опр.      | $1.2 \cdot 10^{-6}$          |
| Лепидомелан               | Не опр.             | Не опр.      | Не опр. | 0.5     | Не опр.      | 0.0019                       |
| Пеннин                    | –                   | 0.05         | 1       | Не опр. | Не опр.      | 0.13                         |
| Рипидолит                 | 0.15                | 1.7          | 7.3     | Не опр. | Не опр.      | 1.36                         |
| Серпентин                 | $23 \cdot 10^{-8}$  | Не опр.      | 0.03    | Не опр. | 16           | 0.064                        |
| <i>Каркасные силикаты</i> |                     |              |         |         |              |                              |
| Нефелин                   | Не опр.             | Не опр.      | 0.05    | 11      | Не опр.      | 0.047                        |
| Анальцим                  | Не опр.             | Не опр.      | Не опр. | 0.01    | Не опр.      | $38 \cdot 10^{-6}$           |
| Анортит                   | Не опр.             | Не опр.      | 0.2     | Не опр. | 8.5          | 0.055                        |
| Битовнит                  | Не опр.             | 0.1          | 2.7     | Не опр. | Не опр.      | 0.33                         |
| Лабрадор                  | 0.2                 | 0.7          | 19.5    | Не опр. | Не опр.      | 2.52                         |
| Андезин                   | 1.8                 | 24           | 15      | 11      | Не опр.      | 9.01                         |
| Олигоклаз                 | 30                  | 21           | 4       | 6       | Не опр.      | 24.53                        |
| Альбит                    | 3.5                 | 0.7          | 0.3     | 2       | 4            | 2.41                         |
| КПШ                       | 26                  | 12           | 1       | 39      | 0.9          | 19.52                        |
| Канкринит                 | Не опр.             | Не опр.      | Не опр. | 0.045   | Не опр.      | $17 \cdot 10^{-5}$           |
| Содалит                   | Не опр.             | Не опр.      | Не опр. | 0.13    | Не опр.      | $49 \cdot 10^{-5}$           |
| Гидросодалит              | Не опр.             | Не опр.      | Не опр. | 0.05    | Не опр.      | $19 \cdot 10^{-5}$           |
| Нозеан                    | Не опр.             | Не опр.      | Не опр. | 0.5     | Не опр.      | 0.0019                       |
| Гельвин                   | $6 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.      | Не опр. | Не опр. | Не опр.      | $3.7 \cdot 10^{-5}$          |
| Натролит                  | Не опр.             | Не опр.      | Не опр. | 0.5     | Не опр.      | 0.0019                       |

пород. В том числе, %: сульфиды – 0.037, флюорит – 0.004, оксиды – 1.69, карбонаты, сульфаты, фосфаты, вольфраматы, силикаты редких элементов и титана – 0.26. Но еще 20.5% массы магматических пород представлено такими перспективными для крупномасштабного освоения минералами, как калиевые полевые шпаты, оливин, мусковит. Доля реакционно-способных минералов (сульфиды, флюорит, карбонаты, сульфаты, шеелит, фосфаты, гельвин) в магматических породах составляет 0.21%, минералов, опасных в экологическом отношении (сульфиды, флюорит и др.) около 0.1%, минералов наиболее токсичных элементов (Hg, Be, Pb, As, U, Th) – около 0.0006%.

Магматические породы континентальной коры как источник потенциального минерального сырья несколько уступают осадочным. Доля массы минералов, опасных в экологическом отношении, здесь существенна, но меньшая чем в осадочных породах.

### **Параметаморфические породы.**

При выделении метаморфизованных осадочных пород из гнейсов и сланцев решающим было заключение авторов описаний. При отсутствии достаточно подробных описаний учитывалась геологическая позиция горных пород и содержание в них типоморфных минералов (графита, кордиерита, силлиманита и др.). Учтены также известные автору полуколичественные оценки минерального состава горных пород. При расчетах использованы преимущественно данные о горных породах перечисленных ниже.

*Метапесчаники.* Доордовикские метапесчаники, конгломераты и кварциты Приполярного Урала (Вигорова, Покровский, 1973; Крылова, Кокарев, 1986; Фишман и др., 1966); кварциты Ильменских гор на Южном Урале (Доминиковский и др., 1971; Панков, 1971); аркозовые кварциты и метаграувакки Калифорнии (Ernst, 1965); докембрийские кристаллические сланцы и кварциты Украинского щита (Горошников, 1971; Носырев и др., 1986); докембрийские кварциты Антарктиды (Равич, Соловьев, 1966; Равич, Каменев, 1972).

*Парасланцы.* Меловые филлиты и сланцы венесуэльских Анд (Kovisars, 1971); триасовые и палеозойские метаамфиболиты и амфиболовые сланцы Калифорнии (Davis et al., 1965); кремнистые сланцы Калифорнии (Ernst, 1965); метасоматически измененные черные сланцы Западного Узбекистана (Кромская, 1973); рифейские парагнейсы и парасланцы Западных Рудных гор в Центральной Европе (Ермолаев и др., 1976); содержащие графит плагиогнейсы Ильменогорского комплекса на Южном Урале (Доминиковский, 1971; Панков, 1971); кембрийские или протерозойские альбит-серпичит-кварцевые метафиллиты западного склона Северного Урала (Старков, 1963); докембрийские и раннепалеозойские парасланцы Мариленда, Пьемонт (Fisher, 1971) и Монтаны (Buttler, 1966); содержащие графит плагиогнейсы Нью-Джерси (Yung, 1971); кристаллические сланцы Украинского щита (Железисто-кремнистые..., 1978; Носырев и др., 1986); докембрийские парасланцы Приполярного Урала (Вигорова, Покровский, 1973); докембрийские парагнейсы и парамигматиты Венесуэлы (Kalliokoski, 1965); метаосадочные породы Кейвской и Стрельнинской серий, дистеновые гнейсы Беломорского комплекса Балтийского щита (Володичев, 1975; Вулканизм..., 1987); докембрийские параметаморфические породы Антарктиды: плагиогнейсы, переслаивающиеся с кварцитами, кальцифирами, мраморами, и содержащие графит мигматиты по глиноземистым сланцам (Равич, Каменев, 1972; Равич, Соловьев, 1966).

*Карбонатные породы.* Доордовикские мраморы и кальцифиры Приполярного Урала (Фишман и др., 1966); Украинского щита (Железисто-кремнистая..., 1974; Карбонатные..., 1975; Носырев и др., 1986); Кольского полуострова (Володичев, 1975), Антарктиды (Равич, Каменев, 1972; Равич, Соловьев, 1966).

*Железистые породы.* Докембрийские железистые кварциты западного склона Южного Урала (Ермаков, 1959), Курской магнитной аномалии (Илларионов, 1965); докембрийские железистые породы Украины (Белевцев и др., 1975; Гершойг, 1965, 1968; Железисто-кремнистая..., 1974; Железисто-кремнистые..., 1978; Игумнова, Киселева, 1965; Кравченко, 1969; Стрыгин, 1969).

В параметаморфических породах (табл. 1.12) суммарное содержание минералов, традиционно используемых для получения химических элементов и их соединений: графита, сульфидов, оксидов (кроме кварца), гидроксидов, карбонатов, фосфатов, силикатов редких элементов, 4.92%. Около 11% массы параметаморфических пород представлено минералами, перспективными для крупномасштабной химической переработки (силикаты Ti, Mn, Al, оливины, мусковит, калиевые полевые шпаты). Суммарное среднее содержание реакционноспособных минералов 3.1% (сульфиды, флюорит, карбонаты, фосфаты). Суммарное содержание минералов наиболее опасных в экологическом отношении 0.15% (сульфиды, флюорит), реакционноспособных минералов наиболее токсичных элементов – 0.00003% (Pb, As). Таким образом, содержание потенциально полезных минералов здесь меньше, чем в осадочных породах, но меньше и суммарное содержание реакционноспособных минералов, в том числе токсичных.

### **Ортометаморфические породы.**

Учтены в основном количественные и отчасти полуколичественные оценки минерального состава горных пород. При расчетах использованы преимущественно данные о горных породах, перечисленных ниже.

*Гранито-гнейсы.* Меловые гнейсы Сьерра-Невады (Kovisars, 1971); ортогнейсы граносиенитового состава района Нью-Йорка (Buddington, 1963); ортогнейсы Урала и Тувы (Ляхович, 1968; Фишман и др., 1966; Маркс, 1969); плагиогнейсы и мигматиты граносиенитового состава района оз. Байкал (Макрыгина, 1984); аподиабазовые и апогнейсовые мигматиты Криворожской зоны (Трощенко, 1975); докембрийские гранито-гнейсы Монтаны (Buttler, 1966); докембрийские плагиогранито-гнейсы Нью-Джерси (Young, 1971); гнейсы Украинского щита (Носырев и др., 1986); своеобразные богатые кварцем и бедные плагиоклазами гнейсы Кольского полуострова (Бельков и др., 1988); плагиогранито-гнейсы Чупино-Лоухского района Северной Карелии (Арутюнов, 1971); докембрийские плагиогранито-гнейсы центральной и западной частей Беломорья (Володичев, 1975) и плагиогнейсы Антарктиды (Равич, Каменев, 1972).

*Метариолиты.* Уральские палеозойские и допалеозойские метаморфизованные липариты, дациты, кварцевые порфиры, липаритовые и трахилипаритовые порфиры их туфы (Голдин и др., 1975; Дианова, 1958; Язева, 1973; Гурбанов и др., 1999); докембрийские метаморфизованные кислые вулканы Украинского щита (Носырев и др., 1986). Учтены полуколичественные данные по другим объектам. В частности по гелефлинтам и лептитам Карелии (Лазур и др., 1988).

*Метаандезиты.* Палеозойские метаморфизованные андезит-базальтовые порфириты Урала (Сазонов, 1991); протерозойские кварцсодержащие

Таблица 1.12

## Среднее содержание минералов (%) в параметаморфических породах

| Минералы                   | Метапесчаники       | Парасланцы          | Карбонатные породы | Железистые породы | В целом             |
|----------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Самородные элементы</i> |                     |                     |                    |                   |                     |
| Серебро                    | $1.1 \cdot 10^{-7}$ | $2.5 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.            | Не опр.           | $2.3 \cdot 10^{-7}$ |
| Золото                     | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.           | $1.3 \cdot 10^{-8}$ |
| Висмут                     | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр.           | $4.4 \cdot 10^{-8}$ |
| Свинец                     | Не опр.             | $3 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.            | Не опр.           | $2.6 \cdot 10^{-7}$ |
| Графит                     | 0.27                | 0.3                 | Не опр.            | Не опр.           | 0.28                |
| <i>Сульфиды</i>            |                     |                     |                    |                   |                     |
| Акантит                    | $3.7 \cdot 10^{-8}$ | $9 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр.           | $8.2 \cdot 10^{-8}$ |
| Аргентит                   | $7 \cdot 10^{-8}$   | $1.7 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.            | Не опр.           | $1.5 \cdot 10^{-7}$ |
| Пентландит                 | Не опр.             | 0.0001              | Не опр.            | Не опр.           | $87 \cdot 10^{-6}$  |
| Сфалерит                   | $13 \cdot 10^{-5}$  | $7 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.            | Не опр.           | $7.2 \cdot 10^{-5}$ |
| Халькопирит                | $4 \cdot 10^{-5}$   | $11 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | Не опр.           | $13 \cdot 10^{-6}$  |
| Тетраэдрит                 | $5.3 \cdot 10^{-8}$ | $1.3 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.            | Не опр.           | $1.2 \cdot 10^{-7}$ |
| Фрейбергит                 | $3.7 \cdot 10^{-8}$ | $9 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр.           | $8.2 \cdot 10^{-8}$ |
| Пирротин                   | 0.01                | 0.07                | 0.11               | —                 | 0.066               |
| Никелин                    | Не опр.             | $16 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | Не опр.           | $14 \cdot 10^{-6}$  |
| Галенит                    | $8 \cdot 10^{-7}$   | $5 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.            | Не опр.           | $4.4 \cdot 10^{-6}$ |
| Ковеллин                   | $8 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.           | $67 \cdot 10^{-9}$  |
| Висмутин                   | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр.           | $4.4 \cdot 10^{-8}$ |
| Стефанит                   | $3.3 \cdot 10^{-8}$ | $8 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр.           | $7.3 \cdot 10^{-8}$ |
| Пираргирит                 | $7.4 \cdot 10^{-8}$ | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.            | Не опр.           | $1.5 \cdot 10^{-7}$ |
| Виоларит                   | Не опр.             | $25 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | Не опр.           | $22 \cdot 10^{-6}$  |
| Пирит                      | 0.05                | 0.08                | 0.05               | 0.07              | 0.076               |
| Вазсит                     | Не опр.             | $25 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | Не опр.           | $22 \cdot 10^{-6}$  |
| Герсдорфит                 | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.            | Не опр.           | $9 \cdot 10^{-6}$   |
| Арсенопирит                | $5 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.           | $4 \cdot 10^{-7}$   |
| Молибденит                 | $18 \cdot 10^{-6}$  | $18 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.            | Не опр.           | $17 \cdot 10^{-6}$  |
| <i>Галогениды</i>          |                     |                     |                    |                   |                     |
| Флюорит                    | 0.0027              | 0.005               | Не опр.            | Не опр.           | 0.0046              |
| <i>Оксиды</i>              |                     |                     |                    |                   |                     |
| Шпинель                    | 0.03                | 0.068               | 0.04               | Не опр.           | 0.062               |
| Магнетит                   | 0.73                | 0.8                 | 0.08               | 22                | 1                   |
| Якобсит                    | 0.0009              | 0.0009              | $5 \cdot 10^{-5}$  | Не опр.           | $8.6 \cdot 10^{-4}$ |
| Хромит                     | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.            | Не опр.           | $9 \cdot 10^{-7}$   |
| Гаусманит                  | 0.004               | 0.003               | $5 \cdot 10^{-4}$  | Не опр.           | 0.003               |
| Хризоберилл                | Не опр.             | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.           | $1.6 \cdot 10^{-7}$ |
| Корунд                     | Не опр.             | 0.012               | 0.01               | Не опр.           | 0.01                |
| Гематит                    | 0.11                | 0.08                | 0.03               | 4.4               | 0.128               |
| Ильменит                   | 0.22                | 0.15                | Не опр.            | Не опр.           | 0.15                |
| Кварц                      | 46.5                | 28                  | 4.8                | 31                | 28.83               |
| Рутил                      | 0.042               | 0.0068              | Не опр.            | Не опр.           | 0.0094              |

Продолжение табл. 1.12

| Минералы                  | Метапесчаники       | Парасланцы          | Карбонатные породы  | Железистые породы | В целом             |
|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| Касситерит                | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | Не опр.           | $4.4 \cdot 10^{-6}$ |
| Пирролюзит                | $4.3 \cdot 10^{-4}$ | $7 \cdot 10^{-4}$   | $5 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.           | $6.5 \cdot 10^{-4}$ |
| Криптомелан               | 0.0006              | 0.0006              | $5 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.           | $5.8 \cdot 10^{-4}$ |
| Голландит                 | 0.0039              | 0.0017              | 0.0006              | Не опр.           | 0.0018              |
| Псиломелан                | $1.7 \cdot 10^{-4}$ | $2.9 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$   | Не опр.           | $2.8 \cdot 10^{-4}$ |
| Ильменорутит              | Не опр.             | $2 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.             | Не опр.           | $1.7 \cdot 10^{-7}$ |
| Анатаз                    | Не опр.             | 0.0015              | Не опр.             | Не опр.           | 0.0013              |
| <i>Гидроксиды</i>         |                     |                     |                     |                   |                     |
| Диаспор                   | Не опр.             | 0.16                | 0.009               | Не опр.           | 0.14                |
| Гетит                     | 0.04                | Не опр.             | Не опр.             | 0.2               | 0.0055              |
| <i>Карбонаты</i>          |                     |                     |                     |                   |                     |
| Магнезит                  | Не опр.             | Не опр.             | 1                   | 0.5               | 0.037               |
| Сидерит                   | 0.07                | 0.1                 | 0.3                 | 1.4               | 0.12                |
| Mg-сидерит                | Не опр.             | Не опр.             | 0.5                 | 0.1               | 0.017               |
| Родохрозит                | 0.0027              | 0.0027              | 0.001               | Не опр.           | 0.0026              |
| Кальцит                   | 0.5                 | 0.3                 | 47                  | 0.01              | 1.81                |
| Mn-кальцит                | 0.0016              | 0.0012              | 0.0013              | Не опр.           | 0.0012              |
| Кутнагорит                | 0.0025              | 0.0023              | 0.001               | Не опр.           | 0.0022              |
| Доломит                   | 0.02                | 0.1                 | 19                  | 0.2               | 0.7                 |
| Анкерит                   | Не опр.             | Не опр.             | 1.2                 | 0.05              | 0.039               |
| Малахит                   | $1 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.           | $84 \cdot 10^{-8}$  |
| <i>Вольфраматы</i>        |                     |                     |                     |                   |                     |
| Шеелит                    | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | Не опр.           | $44 \cdot 10^{-7}$  |
| <i>Фосфаты</i>            |                     |                     |                     |                   |                     |
| Монацит                   | 0.0003              | 0.0009              | Не опр.             | Не опр.           | 0.0008              |
| Апатит                    | 0.23                | 0.2                 | 0.12                | 0.1               | 0.2                 |
| <i>Островные силикаты</i> |                     |                     |                     |                   |                     |
| Фенакит                   | Не опр.             | $7 \cdot 10^{-7}$   | $7 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.           | $8.4 \cdot 10^{-7}$ |
| Форстерит                 | Не опр.             | Не опр.             | 1                   | Не опр.           | 0.032               |
| Оливин                    | Не опр.             | Не опр.             | 1.5                 | Не опр.           | 0.048               |
| Фаялит                    | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.             | 1                 | 0.011               |
| Тефроит                   | 0.0056              | 0.004               | 0.0002              | Не опр.           | 0.004               |
| Альмандин                 | 1.5                 | 1.5                 | 0.07                | 5                 | 1.49                |
| Спессартин                | 0.0087              | 0.0075              | $7.5 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.           | 0.0073              |
| Гроссуляр                 | Не опр.             | Не опр.             | 0.05                | Не опр.           | 0.0016              |
| Андрадит                  | Не опр.             | Не опр.             | 0.001               | 0.31              | 0.0034              |
| Циркон                    | 0.029               | 0.014               | $7 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.           | 0.015               |
| Торит                     | $25 \cdot 10^{-6}$  | $35 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.             | Не опр.           | $33 \cdot 10^{-6}$  |
| Силлиманит                | 0.23                | 0.97                | Не опр.             | Не опр.           | 0.87                |
| Андалузит                 | 0.1                 | 0.2                 | Не опр.             | Не опр.           | 0.18                |
| Дистен                    | 0.003               | 0.02                | Не опр.             | Не опр.           | 0.018               |

Продолжение табл. 1.12

| Минералы                   | Метапесчаники     | Парасланцы          | Карбонатные породы  | Железистые породы | В целом             |
|----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| Топаз                      | Не опр.           | 0.0015              | Не опр.             | Не опр.           | 0.0013              |
| Ставролит                  | 0.008             | 0.14                | Не опр.             | Не опр.           | 0.13                |
| Сапфирин                   | 0.003             | 0.007               | Не опр.             | Не опр.           | 0.0064              |
| Корнерупин                 | Не опр.           | 0.0019              | Не опр.             | Не опр.           | 0.0017              |
| Гумит                      | Не опр.           | Не опр.             | 0.09                | Не опр.           | 0.0029              |
| Клиногумит                 | Не опр.           | Не опр.             | 0.1                 | 0.1               | 0.0043              |
| Титанит                    | 0.15              | 0.15                | 0.005               | Не опр.           | 0.14                |
| Лейкоксен                  | $5 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.           | $4 \cdot 10^{-7}$   |
| Браунит                    | 0.008             | 0.008               | 0.001               | Не опр.           | 0.0077              |
| Лосонит                    | 0.7               | 0.7                 | Не опр.             | Не опр.           | 0.67                |
| Берtrandит                 | Не опр.           | Не опр.             | $6 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.           | $1.9 \cdot 10^{-7}$ |
| Эпидот                     | 1.8               | 2.5                 | 0.1                 | 0.1               | 2.34                |
| Цоизит                     | Не опр.           | 0.04                | Не опр.             | Не опр.           | 0.035               |
| Ортит                      | 0.0012            | 0.008               | Не опр.             | Не опр.           | 0.0071              |
| Пумпеллиит                 | 0.5               | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.           | 0.042               |
| Везувиян                   | 0.1               | 0.063               | Не опр.             | Не опр.           | 0.063               |
| Пренит                     | 0.4               | 0.5                 | Не опр.             | Не опр.           | 0.47                |
| <i>Кольцевые силикаты</i>  |                   |                     |                     |                   |                     |
| Берилл                     | Не опр.           | $4.4 \cdot 10^{-5}$ | $1.3 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.           | $3.9 \cdot 10^{-5}$ |
| Кордиерит                  | 0.01              | 0.026               | Не опр.             | Не опр.           | 0.024               |
| Турмалин                   | 0.0007            | 0.0033              | Не опр.             | Не опр.           | 0.0029              |
| <i>Цепочечные силикаты</i> |                   |                     |                     |                   |                     |
| Диопсид                    | 0.1               | 0.5                 | 1.5                 | 0.05              | 0.49                |
| Геденбергит                | Не опр.           | Не опр.             | Не опр.             | 0.1               | 0.0011              |
| Салит                      | Не опр.           | Не опр.             | 0.4                 | 4                 | 0.056               |
| Жадеит                     | 0.1               | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.           | 0.0083              |
| Эгирин                     | Не опр.           | Не опр.             | Не опр.             | 2.5               | 0.027               |
| Авгит                      | 0.3               | 0.4                 | Не опр.             | Не опр.           | 0.37                |
| Энстатит                   | Не опр.           | Не опр.             | Не опр.             | 0.05              | $5.4 \cdot 10^{-4}$ |
| Бронзит                    | Не опр.           | 0.009               | Не опр.             | 0.05              | 0.0084              |
| Гиперстен                  | Не опр.           | 0.06                | Не опр.             | 2                 | 0.074               |
| Куммингтонит               | 0.05              | 0.8                 | 0.017               | 0.3               | 0.71                |
| Тремолит                   | Не опр.           | Не опр.             | 1.3                 | Не опр.           | 0.042               |
| Актинолит                  | 0.25              | 0.54                | 0.4                 | 1.2               | 0.52                |
| Рибекит                    | 0.3               | 0.5                 | Не опр.             | 0.7               | 0.47                |
| Глаукофан                  | 0.05              | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.           | 0.0042              |
| Роговая обманка            | 3.5               | 5.7                 | 0.8                 | 2.6               | 5.32                |
| Антофиллит                 | Не опр.           | 0.011               | Не опр.             | Не опр.           | 0.0096              |
| Волластонит                | Не опр.           | Не опр.             | 0.05                | Не опр.           | 0.0016              |
| Родонит                    | 0.001             | 0.001               | 0.0001              | Не опр.           | $9.6 \cdot 10^{-4}$ |
| <i>Слоистые силикаты</i>   |                   |                     |                     |                   |                     |
| Тальк                      | Не опр.           | Не опр.             | 4                   | Не опр.           | 0.13                |
| Парагонит                  | 1.2               | 1.2                 | Не опр.             | Не опр.           | 1.15                |

| Минералы                  | Метапесчаники | Парасланцы         | Карбонатные породы | Железистые породы | В целом              |
|---------------------------|---------------|--------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| Мусковит                  | 1.8           | 2.7                | 0.5                | Не опр.           | 2.52                 |
| Фенгит                    | 0.7           | 0.022              | Не опр.            | 3                 | 0.11                 |
| Флогопит                  | Не опр.       | Не опр.            | 0.7                | Не опр.           | 0.023                |
| Биотит                    | 6.5           | 9                  | 1.5                | 0.5               | 8.46                 |
| Стильпномелан             | 0.2           | 0.026              | Не опр.            | 3.3               | 0.075                |
| Пеннин                    | 0.15          | 0.77               | Не опр.            | Не опр.           | 0.69                 |
| Клинохлор                 | 2             | 1.7                | 0.3                | Не опр.           | 1.66                 |
| Рипидолит                 | 1.7           | 1.4                | 1.1                | 2.1               | 1.42                 |
| Тюрингит                  | Не опр.       | 0.05               | Не опр.            | 0.4               | 0.048                |
| Серпентин                 | Не опр.       | 0.002              | 5.6                | Не опр.           | 0.18                 |
| Гарниерит                 | Не опр.       | 4·10 <sup>-5</sup> | Не опр.            | Не опр.           | 3.5·10 <sup>-5</sup> |
| Гизингерит                | Не опр.       | Не опр.            | Не опр.            | 0.05              | 0.0005               |
| Пальгорскит               | Не опр.       | Не опр.            | Не опр.            | 0.05              | 0.0005               |
| <i>Каркасные силикаты</i> |               |                    |                    |                   |                      |
| Анортит                   | Не опр.       | Не опр.            | 0.03               | Не опр.           | 0.001                |
| Битовнит                  | Не опр.       | Не опр.            | 0.05               | Не опр.           | 0.0016               |
| Лабрадор                  | 0.5           | 2                  | 0.1                | Не опр.           | 1.79                 |
| Андезин                   | 0.9           | 7                  | 0.5                | 6                 | 6.27                 |
| Олигоклаз                 | 6.5           | 12                 | 0.7                | 3                 | 11.08                |
| Альбит                    | 9             | 7                  | 0.3                | 1                 | 6.89                 |
| КПШ                       | 9             | 8.5                | 0.9                | 0.05              | 8.2                  |
| Гельвин                   | Не опр.       | Не опр.            | 5·10 <sup>-6</sup> | Не опр.           | 1.6·10 <sup>-7</sup> |
| Скаполиты                 | Не опр.       | Не опр.            | 0.4                | Не опр.           | 0.013                |
| Томсонит                  | 0.3           | 0.15               | Не опр.            | Не опр.           | 0.16                 |

амфиболиты Северного Кавказа (Кременецкий, Овчинников, 1986); некоторые докембрийские кварц-амфибол-полевошпатовые эклогитоподобные породы Кольского полуострова (Володичев, 1975); некоторые архейские кварц-пироксен-амфибол-плагноклазовые сланцы Антарктиды (Равич, Каменев, 1972).

*Метабазиты.* Меловые амфиболиты Венесуэлы (Kovisars, 1971); палеозойские зеленые сланцы Калифорнии (Davis et al., 1965); палеозойские метаморфизованные диабазы и андезит-базальтовые порфиры Среднего Урала (Сазонов, 1989, 1991); метабазальты именновской свиты на Урале (Гурбанов и др., 1999); послеордовикские и доордовикские амфиболиты, диабазы, габбро-диабазы, порфириты Приполярного Урала (Фишман и др., 1966, 1968); метабазальты Калифорнии (Ernst, 1965); амфиболовые сланцы Манхеттенской формации района Нью-Йорк (Blank, 1972); метабазиты Среднего Приднестровья (Танатар-Бараш, Дудник, 1977); ортоамфиболит (проба АБ-246) Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984); амфиболиты Ильменских гор на Среднем Урале (Панков, 1971); докембрийские ортоамфиболиты Центрального Памира (Акрамов, Дусматов, 1986); докембрийские зеленые сланцы и аподиабазовые амфиболиты Приполяр-

ного Урала (Крылова и др., 1986); докембрийские амфиболиты Венесуэлы (Kalliokoski, 1965); Монтаны и Вайоминга (Buttler, 1966); докембрийские метаэффузивы, метагаббро, амфиболиты и двупироксен-плагиоклазовые гнейсы Украинского щита (Железисто-кремнистая..., 1974; Носырев и др., 1986; Щербаков, 1975); докембрийские амфиболиты, эклогиты и эклогитоподобные породы Кольского полуострова (Володичев, 1975); архейские пироксен-плагиоклазовые и гранат-пироксен-плагиоклазовые ортосланцы Антарктиды (Равич, Каменев, 1972).

Ортометаморфические породы по минеральному составу (табл. 1.13) относительно близки к магматическим породам. Но в них существенно больше цепочечных и слоистых силикатов, меньше кварца и калиевых полевых шпатов. Минералы, являющиеся традиционными источниками химических элементов (кроме О и Si) и их соединений, составляют около 1.417% массы ортометаморфических пород, в том числе, %: сульфиды – 0.057, оксиды (кроме кварца) – 0.62, карбонаты, сульфаты, фосфаты, вольфраматы – 0.42; силикаты, Ti, Al и редких элементов – 0.32. Но еще 12.88% массы здесь представлено такими перспективными для крупномасштабного освоения минералами, как калиевые шпаты и мусковит; реакционноспособные минералы (самородные элементы, сульфиды, флюорит, карбонаты, барит, шеелит, фосфаты) в ортометаморфических породах – 0.47%; минералы, опасные в экологическом отношении (сульфиды, флюорит и др.), около 0.057%; реакционноспособные минералы наиболее токсичных элементов (Hg, Pb, As, U) около  $2.3 \cdot 10^{-5}$  %.

Рассматривая метаморфические породы в целом (см. табл. 1.14), отметим, что в них определено содержание некоторых минералов, не учтенных в магматических породах, но общее количество минералов, учтенных в метаморфических породах, меньше. Последнее объясняется меньшей изученностью этих пород и тем, что это объект более трудный для количественного минералогического анализа. Минеральные частицы здесь в целом мельче. В известных автору результатах количественных минералогических анализов не учтены многие минералы, известные в метаморфических породах, например легкие акцессорные и даже частично типоморфные. Так, не установлено содержание флюорита в парагнейсах, корунда в карбонатных породах. Содержание последнего принято автором условно на основании качественных данных о закономерностях его локализации.

#### **1.2.4. Средний минеральный состав верхней части континентальной коры**

Среднее содержание минералов в верхней части континентальной коры и в ее слоях (табл. 1.14) определено по данным о горных породах, перечисленных выше. Средний минеральный состав континентальной коры, %: каркасные силикаты – 38.27, оксиды – 26.31 (в том числе оксиды Si – 25.28), слоистые (листовые) силикаты – 18.44, цепочечные силикаты – 7.06, карбонаты – 4.893 (в том числе кальцит и арагонит – 4.02), островные силикаты – 3.27, стекла – 0.34, гидроксиды – 0.201, галогениды – 0.193, фосфаты – 0.14 (в том числе апатит – 0.13), графит – 0.12, углерод органических



**Среднее содержание минералов (%) в ортометаморфических породах  
гранитно-метаморфического слоя**

| Минералы                   | Гранито-гнейсы      | Метариолиты         | Метаандезиты       | Метабазиты         | В целом             |
|----------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| <i>Самородные элементы</i> |                     |                     |                    |                    |                     |
| Медь                       | $1 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $82 \cdot 10^{-9}$  |
| Серебро                    | $2.4 \cdot 10^{-8}$ | $4 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр.            | $2.4 \cdot 10^{-8}$ |
| Свинец                     | $1 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $8 \cdot 10^{-8}$   |
| Висмут                     | $1 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $8.2 \cdot 10^{-8}$ |
| Графит                     | $2 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.             | Не опр.            | 0.005              | $58 \cdot 10^{-5}$  |
| Муассанит                  | –                   | Не опр.             | Не опр.            | $5 \cdot 10^{-6}$  | $58 \cdot 10^{-8}$  |
| <i>Сульфиды</i>            |                     |                     |                    |                    |                     |
| Халькозин                  | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | $8 \cdot 10^{-7}$  | $93 \cdot 10^{-9}$  |
| Сфалерит                   | $3 \cdot 10^{-5}$   | $2 \cdot 10^{-5}$   | $1 \cdot 10^{-8}$  | $22 \cdot 10^{-7}$ | $2.5 \cdot 10^{-5}$ |
| Акантит                    | $8.5 \cdot 10^{-9}$ | $1.4 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $8.6 \cdot 10^{-9}$ |
| Аргентит                   | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | $2.7 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $1.6 \cdot 10^{-8}$ |
| Халькопирит                | $62 \cdot 10^{-7}$  | $19 \cdot 10^{-5}$  | $9 \cdot 10^{-6}$  | 0.0008             | $57 \cdot 10^{-6}$  |
| Тетраэдрит                 | $1.2 \cdot 10^{-8}$ | $1.8 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $1.2 \cdot 10^{-8}$ |
| Фрейбергит                 | $8.5 \cdot 10^{-9}$ | $1.4 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $8.6 \cdot 10^{-9}$ |
| Пирротин                   | 0.01                | 0.003               | 0.01               | 0.03               | 0.013               |
| Никелин                    | $1 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $82 \cdot 10^{-8}$  |
| Галенит                    | $1.5 \cdot 10^{-5}$ | 0.0001              | $13 \cdot 10^{-9}$ | $7 \cdot 10^{-8}$  | $1.5 \cdot 10^{-5}$ |
| Киноварь                   | $1 \cdot 10^{-7}$   | $2 \cdot 10^{-8}$   | Не опр.            | Не опр.            | $83 \cdot 10^{-9}$  |
| Ковеллин                   | Не опр.             | $2 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-4}$  | $12 \cdot 10^{-6}$  |
| Стефанит                   | $7.5 \cdot 10^{-9}$ | $1.3 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $7.7 \cdot 10^{-8}$ |
| Пираргирит                 | $1.7 \cdot 10^{-8}$ | $2.8 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.            | Не опр.            | $1.7 \cdot 10^{-8}$ |
| Джемсонит                  | Не опр.             | Не опр.             | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-7}$  | $1 \cdot 10^{-8}$   |
| Пирит                      | 0.04                | 0.034               | 0.03               | 0.06               | 0.042               |
| Марказит                   | Не опр.             | 0.0095              | Не опр.            | 0.01               | 0.0014              |
| Арсенопирит                | $4 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-5}$  | $2 \cdot 10^{-5}$  | $75 \cdot 10^{-7}$  |
| Молибденит                 | $85 \cdot 10^{-7}$  | $18 \cdot 10^{-6}$  | $7 \cdot 10^{-9}$  | $16 \cdot 10^{-7}$ | $76 \cdot 10^{-7}$  |
| <i>Галогениды</i>          |                     |                     |                    |                    |                     |
| Флюорит                    | $2 \cdot 10^{-5}$   | 0.0007              | Не опр.            | $3 \cdot 10^{-6}$  | $33 \cdot 10^{-6}$  |
| <i>Оксиды</i>              |                     |                     |                    |                    |                     |
| Шпинель                    | $25 \cdot 10^{-8}$  | $1 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.            | 0.0004             | $18 \cdot 10^{-5}$  |
| Магнетит                   | 0.42                | 0.35                | 0.25               | 0.35               | 0.4                 |
| Хромит                     | Не опр.             | $3 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.            | $2 \cdot 10^{-4}$  | $2.4 \cdot 10^{-5}$ |
| Корунд                     | $4 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.             | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-5}$  | $36 \cdot 10^{-6}$  |
| Гематит                    | 0.0007              | 0.1                 | Не опр.            | 0.12               | 0.017               |
| Ильменит                   | 0.15                | 0.23                | 0.4                | 0.45               | 0.2                 |
| Перовскит                  | $12 \cdot 10^{-5}$  | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-4}$   |
| Пирохлор                   | $2 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $1.6 \cdot 10^{-6}$ |
| Кварц                      | 24                  | 35                  | 15.7               | 5.5                | 21.8                |
| Рутил                      | $48 \cdot 10^{-6}$  | 0.0004              | 0.007              | 0.03               | 0.0038              |
| Касситерит                 | $3.2 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $2.6 \cdot 10^{-8}$ |
| Ильменорутит               | $4 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.             | Не опр.            | Не опр.            | $33 \cdot 10^{-8}$  |

Продолжение табл. 1.13

| Минералы                  | Гранито-гнейсы     | Метариолиты       | Метаандезиты       | Метабазиты        | В целом            |
|---------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| Анаказ                    | 0.0002             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.           | $16 \cdot 10^{-5}$ |
| Брукит                    | Не опр.            | Не опр.           | $3 \cdot 10^{-7}$  | $1 \cdot 10^{-7}$ | $23 \cdot 10^{-9}$ |
| Уранинит                  | $6 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.           | $5 \cdot 10^{-7}$  |
| <i>Гидроксиды</i>         |                    |                   |                    |                   |                    |
| Гетит                     | 0.0027             | Не опр.           | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-5}$ | 0.0022             |
| <i>Карбонаты</i>          |                    |                   |                    |                   |                    |
| Сидерит                   | Не опр.            | 0.1               | 0.72               | 0.55              | 0.093              |
| Кальцит                   | 0.12               | 0.6               | 0.96               | 0.1               | 0.16               |
| Малахит                   | $2 \cdot 10^{-7}$  | $1 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.            | $4 \cdot 10^{-6}$ | $63 \cdot 10^{-8}$ |
| Бастнезит                 | 0.0012             | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.           | 0.001              |
| Бисмутит                  | $1 \cdot 10^{-7}$  | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.           | $82 \cdot 10^{-9}$ |
| <i>Сульфаты</i>           |                    |                   |                    |                   |                    |
| Барит                     | Не опр.            | Не опр.           | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{-8}$  |
| <i>Вольфраматы</i>        |                    |                   |                    |                   |                    |
| Шеелит                    | Не опр.            | $1 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-5}$  | $1 \cdot 10^{-5}$ | $18 \cdot 10^{-7}$ |
| <i>Фосфаты</i>            |                    |                   |                    |                   |                    |
| Ксенотим                  | $75 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.           | $62 \cdot 10^{-6}$ |
| Монацит                   | 0.0027             | $2 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.            | $4 \cdot 10^{-8}$ | 0.0022             |
| Апатит                    | 0.19               | 0.076             | 0.045              | 0.04              | 0.16               |
| <i>Островные силикаты</i> |                    |                   |                    |                   |                    |
| Альмандин                 | 1.3                | 0.5               | 0.1                | 0.5               | 1.14               |
| Андрадит                  | —                  | —                 | —                  | 0.001             | 0.0001             |
| Циркон                    | 0.0057             | 0.014             | $9 \cdot 10^{-4}$  | $9 \cdot 10^{-4}$ | 0.0051             |
| Циртолит                  | $4 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.           | Не опр.            | $7 \cdot 10^{-7}$ | $34 \cdot 10^{-7}$ |
| Торит                     | $4 \cdot 10^{-5}$  | Не опр.           | Не опр.            | 0.0003            | $36 \cdot 10^{-6}$ |
| Силлиманит                | 0.033              | $6 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.            | $5 \cdot 10^{-5}$ | 0.027              |
| Дистен                    | 0.067              | 0.0001            | Не опр.            | $7 \cdot 10^{-5}$ | 0.055              |
| Топаз                     | $4 \cdot 10^{-6}$  | Не опр.           | Не опр.            | Не опр.           | $33 \cdot 10^{-7}$ |
| Ставролит                 | 0.015              | 0.0017            | 0.05               | Не опр.           | 0.014              |
| Титанит                   | 0.15               | 0.17              | 0.55               | 0.4               | 0.19               |
| Лейкоксен                 | $15 \cdot 10^{-5}$ | 0.1               | 0.17               | 0.1               | 0.02               |
| Лосонит                   | Не опр.            | Не опр.           | Не опр.            | 0.28              | 0.033              |
| Клиноцоизит               | Не опр.            | 0.2               | Не опр.            | 1                 | 0.12               |
| Эпидот                    | 0.1                | 2.6               | 2.3                | 7                 | 1.04               |
| Цоизит                    | Не опр.            | Не опр.           | 0.2                | 0.5               | 0.065              |
| Ортит                     | 0.0066             | 0.008             | Не опр.            | Не опр.           | 0.0056             |
| Пумпеллиит                | Не опр.            | Не опр.           | Не опр.            | 0.004             | 0.0002             |
| <i>Кольцевые силикаты</i> |                    |                   |                    |                   |                    |
| Кордиерит                 | Не опр.            | Не опр.           | 0.02               | Не опр.           | 0.002              |
| Турмалин                  | 0.004              | 0.0022            | $17 \cdot 10^{-5}$ | 0.0023            | 0.0036             |

| Минералы                   | Гранито-гнейсы      | Метариолиты       | Метаандезиты | Метабазиты        | В целом             |
|----------------------------|---------------------|-------------------|--------------|-------------------|---------------------|
| <i>Цепочечные силикаты</i> |                     |                   |              |                   |                     |
| Диопсид                    | Не опр.             | Не опр.           | 2            | 1.7               | 0.27                |
| Геденбергит                | Не опр.             | Не опр.           | 0.5          | 0.08              | 0.028               |
| Салит                      | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.      | 0.9               | 0.105               |
| Сподумен                   | $4 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.           | Не опр.      | Не опр.           | $33 \cdot 10^{-8}$  |
| Эгирин                     | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.      | 1                 | 0.12                |
| Авгит                      | 1                   | 0.4               | 1.5          | 9                 | 1.94                |
| Бронзит                    | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.      | 0.5               | 0.058               |
| Гиперстен                  | 0.3                 | 0.1               | 0.7          | 3.3               | 0.66                |
| Куммингтонит               | Не опр.             | Не опр.           | 2            | 5.8               | 0.75                |
| Тремолит                   | Не опр.             | 0.1               | Не опр.      | 0.2               | 0.026               |
| Актинолит                  | Не опр.             | 0.5               | 2            | 5                 | 0.67                |
| Арфведсонит                | Не опр.             | 0.05              | Не опр.      | Не опр.           | 0.0012              |
| Кроссит                    | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.      | 1.5               | 0.18                |
| Гастингсит                 | 1                   | Не опр.           | Не опр.      | 2                 | 1.06                |
| Роговая обманка            | 2.1                 | 1                 | 4.8          | 8                 | 2.86                |
| Жедрит                     | Не опр.             | Не опр.           | 0.5          | Не опр.           | 0.018               |
| <i>Слоистые силикаты</i>   |                     |                   |              |                   |                     |
| Мусковит                   | 0.9                 | 6.5               | 4            | 0.2               | 1.07                |
| Фенгит                     | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.      | 0.01              | 0.0012              |
| Флогопит                   | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.      | 0.1               | 0.012               |
| Биотит                     | 11.5                | 2.5               | 2.8          | 5.8               | 10.06               |
| Лепидолит                  | $1.6 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.           | Не опр.      | Не опр.           | $1.3 \cdot 10^{-5}$ |
| Циннвальдит                | $3 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.           | Не опр.      | Не опр.           | $2.5 \cdot 10^{-5}$ |
| Протолитионит              | $2 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.           | Не опр.      | Не опр.           | $1.6 \cdot 10^{-6}$ |
| Лепидомелан                | 0.26                | Не опр.           | Не опр.      | 0.1               | 0.26                |
| Гидромусковит              | –                   | 0.5               | Не опр.      | –                 | 0.012               |
| Стильпномелан              | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.      | 0.07              | 0.0082              |
| Пеннин                     | Не опр.             | 0.05              | 0.3          | 0.4               | 0.059               |
| Клинохлор                  | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.      | 0.2               | 0.023               |
| Рипидолит                  | 2.8                 | 2                 | 3.6          | 3.8               | 2.93                |
| Тюрингит                   | Не опр.             | 2.7               | 5            | Не опр.           | 0.25                |
| Гарниерит                  | Не опр.             | $4 \cdot 10^{-5}$ | Не опр.      | $2 \cdot 10^{-5}$ | $33 \cdot 10^{-7}$  |
| <i>Каркасные силикаты</i>  |                     |                   |              |                   |                     |
| Анортит                    | Не опр.             | Не опр.           | Не опр.      | 0.04              | 0.0048              |
| Битовнит                   | 0.4                 | Не опр.           | 0.3          | 1.5               | 0.52                |
| Лабрадор                   | 3.4                 | Не опр.           | 3            | 12                | 4.31                |
| Андезин                    | 8                   | Не опр.           | 12           | 14.5              | 8.72                |
| Олигоклаз                  | 26                  | 14.6              | 15           | 2                 | 22.53               |
| Альбит                     | 1                   | 22                | 13.5         | 2                 | 2.06                |
| КПШ                        | 14                  | 5.3               | 3.5          | 0.3               | 11.81               |
| Скаполиты                  | Не опр.             | Не опр.           | 0.3          | 0.3               | 0.046               |
| Томсонит                   | Не опр.             | 0.5               | Не опр.      | Не опр.           | 0.012               |
| Сумма                      | > 99.09             | > 99.36           | > 99.54      | > 99.23           | > 99.14             |

Таблица 1.14

## Среднее содержание минералов (%) в верхней части континентальной коры

| Минералы<br>и прочие вещества | Осадочный слой       |                         |                      | Гранитно-гнейсовый слой |                           |                       | Верхняя<br>часть континентальной<br>коры |
|-------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------------------|
|                               | Осадочные<br>породы  | Вулканические<br>породы | Слой<br>в целом      | Магматические<br>породы | Метаморфические<br>породы | Слой<br>в целом       |                                          |
| Самородные элементы           |                      |                         |                      |                         |                           |                       |                                          |
| Медь                          | 2.6·10 <sup>-8</sup> | 7.3·10 <sup>-6</sup>    | 1.2·10 <sup>-6</sup> | 7.5·10 <sup>-7</sup>    | 3.7·10 <sup>-8</sup>      | 1.6·10 <sup>-7</sup>  | 4.1·10 <sup>-7</sup>                     |
| Серебро                       | 6.9·10 <sup>-8</sup> | 6·10 <sup>-8</sup>      | 6.8·10 <sup>-8</sup> | 5.8·10 <sup>-8</sup>    | 1.4·10 <sup>-7</sup>      | 1.3·10 <sup>-7</sup>  | 1.2·10 <sup>-7</sup>                     |
| Золото                        | 4·10 <sup>-8</sup>   | 1.2·10 <sup>-11</sup>   | 3.4·10 <sup>-8</sup> | 4.2·10 <sup>-8</sup>    | 7.2·10 <sup>-9</sup>      | 1.3·10 <sup>-8</sup>  | 1.8·10 <sup>-8</sup>                     |
| Свинец                        | Не опр.              | 7.2·10 <sup>-7</sup>    | 1.1·10 <sup>-7</sup> | 2.8·10 <sup>-7</sup>    | 1.8·10 <sup>-7</sup>      | 2·10 <sup>-7</sup>    | 1.8·10 <sup>-7</sup>                     |
| Поликсен                      | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | 2.3·10 <sup>-9</sup>    | Не опр.                   | 4·10 <sup>-10</sup>   | 3·10 <sup>-10</sup>                      |
| Иг-платина                    | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | 2.3·10 <sup>-9</sup>    | Не опр.                   | 4·10 <sup>-10</sup>   | 3·10 <sup>-10</sup>                      |
| Цинк                          | Не опр.              | 1.1·10 <sup>-6</sup>    | 1.7·10 <sup>-7</sup> | 5·10 <sup>-8</sup>      | Не опр.                   | 8.6·10 <sup>-9</sup>  | 4.7·10 <sup>-8</sup>                     |
| Олово                         | 1.8·10 <sup>-7</sup> | Не опр.                 | 1.7·10 <sup>-7</sup> | 6.6·10 <sup>-8</sup>    | Не опр.                   | 1.1·10 <sup>-8</sup>  | 4.9·10 <sup>-8</sup>                     |
| Висмут                        | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | 4.5·10 <sup>-8</sup>    | 6·10 <sup>-8</sup>        | 5.7·10 <sup>-8</sup>  | 4.4·10 <sup>-8</sup>                     |
| Графит                        | 0.075                | Не опр.                 | 0.063                | Не опр.                 | 0.16                      | 0.13                  | 0.12                                     |
| Муассонит                     | 1.5·10 <sup>-8</sup> | Не опр.                 | 1.3·10 <sup>-8</sup> | 4·10 <sup>-6</sup>      | 2.6·10 <sup>-7</sup>      | 9.1·10 <sup>-7</sup>  | 7·10 <sup>-7</sup>                       |
| Сера                          | 4.5·10 <sup>-4</sup> | Не опр.                 | 3.8·10 <sup>-4</sup> | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.               | 9·10 <sup>-5</sup>                       |
| Сульфиды                      |                      |                         |                      |                         |                           |                       |                                          |
| Тетрадимит                    | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | 1.2·10 <sup>-7</sup>    | Не опр.                   | 2.1·10 <sup>-8</sup>  | 1.6·10 <sup>-8</sup>                     |
| Халькозин                     | 2.6·10 <sup>-8</sup> | 3.6·10 <sup>-6</sup>    | 5.8·10 <sup>-7</sup> | 1.2·10 <sup>-7</sup>    | 4.1·10 <sup>-8</sup>      | 5.5·10 <sup>-8</sup>  | 1.8·10 <sup>-7</sup>                     |
| Борнит                        | 2.6·10 <sup>-8</sup> | 5.7·10 <sup>-5</sup>    | 8.9·10 <sup>-6</sup> | 8·10 <sup>-7</sup>      | Не опр.                   | 1.4·10 <sup>-7</sup>  | 2.2·10 <sup>-6</sup>                     |
| Акантит                       | 2.3·10 <sup>-8</sup> | 2·10 <sup>-8</sup>      | 2.3·10 <sup>-8</sup> | 2.1·10 <sup>-8</sup>    | 4.9·10 <sup>-8</sup>      | 4.4·10 <sup>-8</sup>  | 3.9·10 <sup>-8</sup>                     |
| Аргентит                      | 4·10 <sup>-8</sup>   | 3.8·10 <sup>-8</sup>    | 4·10 <sup>-8</sup>   | 3.8·10 <sup>-8</sup>    | 9·10 <sup>-8</sup>        | 8.1·10 <sup>-8</sup>  | 7.1·10 <sup>-8</sup>                     |
| Пентландит                    | Не опр.              | 5.7·10 <sup>-5</sup>    | 9·10 <sup>-7</sup>   | 4·10 <sup>-4</sup>      | 4.8·10 <sup>-5</sup>      | 1.1·10 <sup>-4</sup>  | 8.4·10 <sup>-5</sup>                     |
| Сфалерит                      | 2.6·10 <sup>-6</sup> | 1.1·10 <sup>-4</sup>    | 1.9·10 <sup>-5</sup> | 7.5·10 <sup>-5</sup>    | 5.1·10 <sup>-5</sup>      | 5.5·10 <sup>-5</sup>  | 4.6·10 <sup>-5</sup>                     |
| Метациннабарит                | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | 6·10 <sup>-9</sup>      | Не опр.                   | 1·10 <sup>-9</sup>    | 7.6·10 <sup>-10</sup>                    |
| Халькопирит                   | 3.5·10 <sup>-6</sup> | 0.001                   | 1.6·10 <sup>-4</sup> | 3.8·10 <sup>-4</sup>    | 3.3·10 <sup>-5</sup>      | 9.3·10 <sup>-5</sup>  | 1.1·10 <sup>-4</sup>                     |
| Тетраэдрит                    | 3.4·10 <sup>-8</sup> | 3·10 <sup>-8</sup>      | 3.3·10 <sup>-8</sup> | 2.9·10 <sup>-8</sup>    | 7.2·10 <sup>-8</sup>      | 6.5·10 <sup>-8</sup>  | 5.7·10 <sup>-8</sup>                     |
| Фрейбергит                    | 2.3·10 <sup>-8</sup> | 2·10 <sup>-8</sup>      | 2.3·10 <sup>-8</sup> | 2.1·10 <sup>-8</sup>    | 4.9·10 <sup>-8</sup>      | 4.4·10 <sup>-8</sup>  | 3.9·10 <sup>-8</sup>                     |
| Кубанит                       | Не опр.              | 1.7·10 <sup>-4</sup>    | 2.6·10 <sup>-4</sup> | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.               | 6·10 <sup>-6</sup>                       |
| Пирротин                      | 2.6·10 <sup>-6</sup> | 0.029                   | 0.0045               | 0.0096                  | 0.042                     | 0.036                 | 0.029                                    |
| Троилит                       | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | 1.5·10 <sup>-6</sup>    | Не опр.                   | 2.6·10 <sup>-7</sup>  | 2·10 <sup>-7</sup>                       |
| Никелин                       | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 8.1·10 <sup>-6</sup>      | 6.7·10 <sup>-6</sup>  | 5.1·10 <sup>-6</sup>                     |
| Галенит                       | 1.8·10 <sup>-7</sup> | 1.1·10 <sup>-4</sup>    | 1.7·10 <sup>-5</sup> | 6.6·10 <sup>-7</sup>    | 9.1·10 <sup>-6</sup>      | 1.9·10 <sup>-5</sup>  | 1.9·10 <sup>-5</sup>                     |
| Киноварь                      | 3·10 <sup>-8</sup>   | 4.3·10 <sup>-7</sup>    | 9·10 <sup>-8</sup>   | 1.1·10 <sup>-7</sup>    | 3.7·10 <sup>-8</sup>      | 5·10 <sup>-8</sup>    | 5.9·10 <sup>-8</sup>                     |
| Ковеллин                      | Н. опр.              | 3.6·10 <sup>-6</sup>    | 5.6·10 <sup>-7</sup> | 9.5·10 <sup>-7</sup>    | 5.4·10 <sup>-6</sup>      | 4.6·10 <sup>-6</sup>  | 3.6·10 <sup>-6</sup>                     |
| Куперит                       | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | 2.3·10 <sup>-9</sup>    | Не опр.                   | 4·10 <sup>-10</sup>   | 3·10 <sup>-10</sup>                      |
| Антимонит                     | 2.6·10 <sup>-9</sup> | Не опр.                 | 2.2·10 <sup>-9</sup> | 3·10 <sup>-8</sup>      | Не опр.                   | 5.2·10 <sup>-9</sup>  | 4.4·10 <sup>-9</sup>                     |
| Висмутин                      | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | 6·10 <sup>-7</sup>      | 2.4·10 <sup>-8</sup>      | 1·10 <sup>-7</sup>    | 9.2·10 <sup>-8</sup>                     |
| Стефанит                      | 2·10 <sup>-8</sup>   | 1.8·10 <sup>-8</sup>    | 2·10 <sup>-8</sup>   | 1.8·10 <sup>-8</sup>    | 4.4·10 <sup>-8</sup>      | 4·10 <sup>-8</sup>    | 3.5·10 <sup>-8</sup>                     |
| Джемсонит                     | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 4.5·10 <sup>-9</sup>      | 3.7·10 <sup>-9</sup>  | 2.8·10 <sup>-9</sup>                     |
| Буланжерит                    | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | 3·10 <sup>-9</sup>      | Не опр.                   | 5.2·10 <sup>-10</sup> | 4·10 <sup>-10</sup>                      |
| Пираргирит                    | 4.6·10 <sup>-8</sup> | 4.1·10 <sup>-8</sup>    | 4.5·10 <sup>-8</sup> | 4.2·10 <sup>-8</sup>    | 9.1·10 <sup>-8</sup>      | 8.3·10 <sup>-8</sup>  | 7.4·10 <sup>-8</sup>                     |
| Виоларит                      | Не опр.              | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 1.2·10 <sup>-5</sup>      | 1·10 <sup>-5</sup>    | 7.6·10 <sup>-6</sup>                     |
| Пирит                         | 0.1                  | 0.056                   | 0.09                 | 0.024                   | 0.061                     | 0.055                 | 0.063                                    |
| Марказит                      | 0.0026               | Не опр.                 | 0.0022               | 0.0018                  | 6.3·10 <sup>-4</sup>      | 8.3·10 <sup>-4</sup>  | 0.0012                                   |

Продолжение табл. 1.14

| Минералы<br>и прочие вещества | Осадочный слой      |                         |                     | Гранитно-гнейсовый слой |                           |                      | Верхняя<br>часть континентальной<br>коры |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------------------|
|                               | Осадочные<br>породы | Вулканические<br>породы | Слой<br>в целом     | Магматические<br>породы | Метаморфические<br>породы | Слой<br>в целом      |                                          |
| Ваэсит                        | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | $1.2 \cdot 10^{-5}$       | $1 \cdot 10^{-5}$    | $7.6 \cdot 10^{-6}$                      |
| Кобальтин                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $6.3 \cdot 10^{-6}$     | Не опр.                   | $1.1 \cdot 10^{-6}$  | $8.4 \cdot 10^{-7}$                      |
| Герсдорфит                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | $5 \cdot 10^{-6}$         | $4 \cdot 10^{-6}$    | $3 \cdot 10^{-6}$                        |
| Леллингит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $3.8 \cdot 10^{-9}$     | Не опр.                   | $6.6 \cdot 10^{-10}$ | $5 \cdot 10^{-10}$                       |
| Арсенопирит                   | $8 \cdot 10^{-8}$   | $1.2 \cdot 10^{-5}$     | $1.9 \cdot 10^{-6}$ | $4.5 \cdot 10^{-5}$     | $3.6 \cdot 10^{-6}$       | $1.1 \cdot 10^{-5}$  | $8.8 \cdot 10^{-6}$                      |
| Молибденит                    | $5 \cdot 10^{-9}$   | $4.8 \cdot 10^{-6}$     | $7.9 \cdot 10^{-7}$ | $3 \cdot 10^{-5}$       | $1.3 \cdot 10^{-5}$       | $1.6 \cdot 10^{-5}$  | $1.2 \cdot 10^{-5}$                      |
| Реальгар                      | Не опр.             | $7.7 \cdot 10^{-6}$     | $1.2 \cdot 10^{-6}$ | $2.8 \cdot 10^{-9}$     | Не опр.                   | $4.8 \cdot 10^{-10}$ | $2.8 \cdot 10^{-8}$                      |
| Аурипигмент                   | Не опр.             | $1.7 \cdot 10^{-5}$     | $2.6 \cdot 10^{-6}$ | $1.8 \cdot 10^{-6}$     | Не опр.                   | $3.1 \cdot 10^{-7}$  | $8.5 \cdot 10^{-7}$                      |
| <i>Галогениды</i>             |                     |                         |                     |                         |                           |                      |                                          |
| Галит                         | 0.95                | Не опр.                 | 0.81                | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | 0.19                                     |
| Сильвин                       | 0.0033              | Не опр.                 | 0.0028              | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | $6.6 \cdot 10^{-4}$                      |
| Хлораргирит                   | $2.3 \cdot 10^{-8}$ |                         | $1.9 \cdot 10^{-8}$ |                         |                           |                      | $4.5 \cdot 10^{-9}$                      |
| Флюорит                       | $2 \cdot 10^{-7}$   | 0.0001                  | $1.6 \cdot 10^{-5}$ | 0.004                   | 0.0026                    | 0.0028               | 0.0022                                   |
| Бишофит                       | $1.3 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                 | $1 \cdot 10^{-4}$   | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | $2.6 \cdot 10^{-5}$                      |
| Карналлит                     | $6.5 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                 | $5.5 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | $1.3 \cdot 10^{-4}$                      |
| <i>Оксиды</i>                 |                     |                         |                     |                         |                           |                      |                                          |
| Периклаз                      | $1.3 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.                 | $1 \cdot 10^{-7}$   | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | $2.4 \cdot 10^{-8}$                      |
| Шпинель                       | 0.0009              | $1.5 \cdot 10^{-4}$     | $7.8 \cdot 10^{-4}$ | $3.9 \cdot 10^{-6}$     | 0.034                     | 0.028                | 0.022                                    |
| Плеонаст                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $8.3 \cdot 10^{-5}$     | Не опр.                   | $1.4 \cdot 10^{-5}$  | $1.1 \cdot 10^{-5}$                      |
| Магнетит                      | 0.072               | 0.66                    | 0.16                | 1.11                    | 0.73                      | 0.80                 | 0.65                                     |
| Ti-магнетит                   | Не опр.             | 0.96                    | 0.15                | 0.23                    | Не опр.                   | 0.04                 | 0.066                                    |
| Якобсит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | $4.8 \cdot 10^{-4}$       | $4 \cdot 10^{-4}$    | $3 \cdot 10^{-4}$                        |
| Хромит                        | $1.3 \cdot 10^{-4}$ | $2.5 \cdot 10^{-4}$     | $1.5 \cdot 10^{-4}$ | 0.0011                  | $1.1 \cdot 10^{-5}$       | $2 \cdot 10^{-4}$    | $1.9 \cdot 10^{-4}$                      |
| Гаусманит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | 0.0016                    | 0.0014               | 0.001                                    |
| Иоцит                         | Не опр.             | $4 \cdot 10^{-5}$       | $6 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | $1.4 \cdot 10^{-6}$                      |
| Хризоберилл                   | $6.4 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.                 | $5.4 \cdot 10^{-7}$ | $2.8 \cdot 10^{-5}$     | $8.9 \cdot 10^{-8}$       | $4.9 \cdot 10^{-6}$  | $3.9 \cdot 10^{-6}$                      |
| Корунд                        | 0.0016              | $2.7 \cdot 10^{-5}$     | 0.0014              | $4.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.0056                    | 0.0046               | 0.0038                                   |
| Гематит                       | 0.059               | 0.3                     | 0.097               | 0.048                   | 0.078                     | 0.073                | 0.079                                    |
| Ильменит                      | 0.08                | 0.56                    | 0.15                | 0.34                    | 0.17                      | 0.20                 | 0.19                                     |
| Перовскит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $4.4 \cdot 10^{-6}$     | $4.4 \cdot 10^{-5}$       | $3.7 \cdot 10^{-5}$  | $2.8 \cdot 10^{-5}$                      |
| Лопарит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $7.7 \cdot 10^{-6}$     | Не опр.                   | $1.3 \cdot 10^{-6}$  | $1 \cdot 10^{-6}$                        |
| Пироклор                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $4 \cdot 10^{-6}$       | $7 \cdot 10^{-7}$         | $1.3 \cdot 10^{-6}$  | $1 \cdot 10^{-6}$                        |
| Микролит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $6 \cdot 10^{-8}$       | Не опр.                   | $1 \cdot 10^{-8}$    | $7.6 \cdot 10^{-9}$                      |
| Кварц                         | 20.76               | 6.6                     | 18.56               | 25.39                   | 25.69                     | 25.64                | 23.98                                    |
| Тридимит                      | Не опр.             | 0.018                   | 0.0028              | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | $6.6 \cdot 10^{-5}$                      |
| Кристобалит                   | Не опр.             | 0.034                   | 0.0053              | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | 0.0013                                   |
| Опал                          | 6.51                | 0.053                   | 5.5                 | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | 1.3                                      |
| Пирролюзит                    | 0.0016              | Не опр.                 | 0.0013              | $4.7 \cdot 10^{-6}$     | $3.6 \cdot 10^{-4}$       | $3 \cdot 10^{-4}$    | $5.4 \cdot 10^{-4}$                      |
| Рутил                         | 0.028               | $2.4 \cdot 10^{-4}$     | 0.024               | 0.0038                  | 0.0069                    | 0.0064               | 0.011                                    |
| Касситерит                    | $4.7 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.                 | $4 \cdot 10^{-7}$   | $1 \cdot 10^{-5}$       | $2.5 \cdot 10^{-6}$       | $3.8 \cdot 10^{-6}$  | $3 \cdot 10^{-6}$                        |
| Голландит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | 0.001                     | $8.4 \cdot 10^{-4}$  | $6.4 \cdot 10^{-4}$                      |
| Ильменорутил                  | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $1.9 \cdot 10^{-4}$     | $2.4 \cdot 10^{-7}$       | $3.3 \cdot 10^{-5}$  | $2.5 \cdot 10^{-5}$                      |

Продолжение табл. 1.14

| Минералы<br>и прочие вещества | Осадочный слой      |                           |                     | Гранитно-гнейсовый слой   |                                |                      | Верхняя<br>часть конти-<br>нентальной<br>коры |
|-------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|
|                               | Осадочные<br>породы | Вулканичес-<br>кие породы | Слой<br>в целом     | Магматичес-<br>кие породы | Метамор-<br>фические<br>породы | Слой<br>в целом      |                                               |
| Криптомелан                   | $2.6 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                   | $2.2 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                   | $3.2 \cdot 10^{-4}$            | $2.6 \cdot 10^{-4}$  | $2.5 \cdot 10^{-4}$                           |
| Псилометан                    | 0.0011              | Не опр.                   | $9 \cdot 10^{-4}$   | $7.5 \cdot 10^{-6}$       | $1.6 \cdot 10^{-4}$            | $1.3 \cdot 10^{-4}$  | $3.1 \cdot 10^{-4}$                           |
| Тодорокит                     | $4.3 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                   | $3.7 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                   | Не опр.                        | Не опр.              | $8.6 \cdot 10^{-5}$                           |
| Вернадит                      | $1.3 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                   | $1.1 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                   | Не опр.                        | Не опр.              | $2.6 \cdot 10^{-5}$                           |
| Анатаз                        | 0.0063              | $1.2 \cdot 10^{-5}$       | 0.0053              | 0.0004                    | $7.9 \cdot 10^{-4}$            | $7.2 \cdot 10^{-4}$  | 0.0018                                        |
| Брукит                        | $8 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.                   | $7 \cdot 10^{-5}$   | $3.8 \cdot 10^{-6}$       | $1 \cdot 10^{-8}$              | $6.6 \cdot 10^{-7}$  | $1.7 \cdot 10^{-5}$                           |
| Колумбит                      | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-5}$         | Не опр.                        | $8.6 \cdot 10^{-6}$  | $6.6 \cdot 10^{-6}$                           |
| Танталит                      | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | $2 \cdot 10^{-6}$         | Не опр.                        | $3.5 \cdot 10^{-7}$  | $2.6 \cdot 10^{-7}$                           |
| Делоренцит                    | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-8}$         | Не опр.                        | $8.6 \cdot 10^{-9}$  | $6.6 \cdot 10^{-9}$                           |
| Поликраз                      | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | $3 \cdot 10^{-10}$        | Не опр.                        | $5.2 \cdot 10^{-11}$ | $4 \cdot 10^{-11}$                            |
| Эвксенит                      | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | $5 \cdot 10^{-5}$         | Не опр.                        | $8.6 \cdot 10^{-6}$  | $6.6 \cdot 10^{-6}$                           |
| Бломстрандин                  | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | $6.7 \cdot 10^{-6}$       | Не опр.                        | $1.2 \cdot 10^{-6}$  | $9 \cdot 10^{-7}$                             |
| Фергусонит                    | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | $1.8 \cdot 10^{-5}$       | Не опр.                        | $3.1 \cdot 10^{-6}$  | $2.4 \cdot 10^{-6}$                           |
| Бадделеит                     | $1.5 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.                   | $1.3 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.                   | Не опр.                        | Не опр.              | $3.1 \cdot 10^{-7}$                           |
| Торианит                      | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | $2.6 \cdot 10^{-7}$       | Н. опр.                        | $4.5 \cdot 10^{-8}$  | $3.4 \cdot 10^{-8}$                           |
| Уранинит                      | Не опр.             | $6 \cdot 10^{-6}$         | $9.3 \cdot 10^{-7}$ | $4.9 \cdot 10^{-5}$       | $2.2 \cdot 10^{-7}$            | $8.6 \cdot 10^{-6}$  | $6.6 \cdot 10^{-6}$                           |
| <i>Гидроксиды</i>             |                     |                           |                     |                           |                                |                      |                                               |
| Бехоит                        | Не опр.             | $4.8 \cdot 10^{-7}$       | $7.5 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.                   | Не опр.                        | Не опр.              | $1.8 \cdot 10^{-8}$                           |
| Гиббсит                       | 0.21                | Не опр.                   | 0.18                | Не опр.                   | Не опр.                        | Не опр.              | 0.043                                         |
| Диаспор                       | 0.026               | Не опр.                   | 0.022               | Не опр.                   | 0.078                          | 0.065                | 0.055                                         |
| Брусит                        | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | 0.0019                    | Не опр.                        | $3.3 \cdot 10^{-4}$  | $2.5 \cdot 10^{-4}$                           |
| Гетит                         | 0.42                | 0.0013                    | 0.35                | 0.0047                    | 0.004                          | 0.0041               | 0.085                                         |
| Манганит                      | $7.6 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                   | $6.4 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                   | Не опр.                        | Не опр.              | $1.5 \cdot 10^{-4}$                           |
| Бемит                         | 0.092               | Не опр.                   | 0.077               | Не опр.                   | Не опр.                        | Не опр.              | 0.018                                         |
| <i>Карбонаты</i>              |                     |                           |                     |                           |                                |                      |                                               |
| Магнезит                      | 0.0084              | Не опр.                   | 0.0071              | $7.6 \cdot 10^{-4}$       | 0.021                          | 0.017                | 0.015                                         |
| Смитсонит                     | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-6}$         | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.                   | Не опр.                        | Не опр.              | $3.7 \cdot 10^{-8}$                           |
| Сидерит                       | 0.031               | 1.07                      | 0.19                | 0.028                     | 0.11                           | 0.096                | 0.12                                          |
| Mg-сидерит                    | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | Не опр.                   | 0.0094                         | 0.0078               | 0.0059                                        |
| Родохрозит                    | 0.0014              | Не опр.                   | 0.0012              | Не опр.                   | 0.0014                         | 0.0012               | 0.0012                                        |
| Кальцит                       | 16.45               | 0.33                      | 13.94               | 0.019                     | 1.07                           | 0.9                  | 3.98                                          |
| Mn-кальцит                    | 0.002               | Не опр.                   | 0.0017              | Не опр.                   | $6.8 \cdot 10^{-4}$            | $5.6 \cdot 10^{-4}$  | $8.3 \cdot 10^{-4}$                           |
| Доломит                       | 2.29                | 0.057                     | 1.94                | Не опр.                   | 0.39                           | 0.32                 | 0.7                                           |
| Кутнагорит                    | 0.0014              | Не опр.                   | 0.0012              | Не опр.                   | 0.0012                         | 0.001                | 0.001                                         |
| Анкерит                       | 0.085               | Не опр.                   | 0.072               | Не опр.                   | 0.022                          | 0.018                | 0.031                                         |
| Арагонит                      | 0.19                | Не опр.                   | 0.16                | Не опр.                   | Не опр.                        | Не опр.              | 0.038                                         |
| Стронцианит                   | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | $1.5 \cdot 10^{-6}$       | Не опр.                        | $2.6 \cdot 10^{-7}$  | $2 \cdot 10^{-7}$                             |
| Церуссит                      | Не опр.             | $8 \cdot 10^{-6}$         | $1 \cdot 10^{-6}$   | $3 \cdot 10^{-6}$         | Не опр.                        | $5.2 \cdot 10^{-7}$  | $6.3 \cdot 10^{-7}$                           |
| Азурит                        | $1 \cdot 10^{-7}$   | $7 \cdot 10^{-5}$         | $1 \cdot 10^{-5}$   | $9 \cdot 10^{-7}$         | Не опр.                        | $1.6 \cdot 10^{-7}$  | $2.5 \cdot 10^{-6}$                           |
| Малахит                       | $1.3 \cdot 10^{-7}$ | $3.7 \cdot 10^{-6}$       | $5.7 \cdot 10^{-6}$ | $1.4 \cdot 10^{-6}$       | $7.5 \cdot 10^{-7}$            | $8.6 \cdot 10^{-7}$  | $2 \cdot 10^{-6}$                             |
| Досонит                       | $7.8 \cdot 10^{-4}$ | 0.0006                    | $7.5 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                   | Не опр.                        | Не опр.              | $1.8 \cdot 10^{-4}$                           |
| Бастнезит                     | Не опр.             | Не опр.                   | Не опр.             | $2.9 \cdot 10^{-4}$       | $4.5 \cdot 10^{-4}$            | $4.2 \cdot 10^{-4}$  | $3.2 \cdot 10^{-4}$                           |
| Бисмутит                      | $1.6 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.                   | $1.3 \cdot 10^{-8}$ | $6 \cdot 10^{-7}$         | $3.7 \cdot 10^{-8}$            | $1.3 \cdot 10^{-7}$  | $1.1 \cdot 10^{-7}$                           |

Продолжение табл. 1.14

| Минералы<br>и прочие вещества | Осадочный слой      |                         |                     | Гранитно-гнейсовый слой |                           |                     | Верхняя<br>часть континентальной<br>коры |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|------------------------------------------|
|                               | Осадочные<br>породы | Вулканические<br>породы | Слой<br>в целом     | Магматические<br>породы | Метаморфические<br>породы | Слой<br>в целом     |                                          |
| Сульфаты                      |                     |                         |                     |                         |                           |                     |                                          |
| Ангидрит                      | 0.23                | Не опр.                 | 0.19                | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.045                                    |
| Целестин                      | $8.7 \cdot 10^{-4}$ | Не опр.                 | $7.3 \cdot 10^{-4}$ | $1.7 \cdot 10^{-5}$     | Не опр.                   | $2.9 \cdot 10^{-6}$ | $1.7 \cdot 10^{-4}$                      |
| Англезит                      | Не опр.             | Не опр.                 |                     | $2.5 \cdot 10^{-6}$     | Не опр.                   | $4.3 \cdot 10^{-7}$ | $3.3 \cdot 10^{-7}$                      |
| Барит                         | 0.0034              | 0.0013                  | 0.0031              | $2.6 \cdot 10^{-6}$     | $4.5 \cdot 10^{-9}$       | $4.5 \cdot 10^{-7}$ | $7.3 \cdot 10^{-4}$                      |
| Алунит                        | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $6 \cdot 10^{-8}$       | Не опр.                   | $1 \cdot 10^{-8}$   | $7.6 \cdot 10^{-9}$                      |
| Ярозит                        | 0.002               | Не опр.                 | 0.0017              | $1.1 \cdot 10^{-5}$     | Не опр.                   | $1.9 \cdot 10^{-6}$ | 0.0004                                   |
| Кизерит                       | 0.0034              | Не опр.                 | 0.0029              | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | $6.7 \cdot 10^{-4}$                      |
| Гипс                          | 0.12                | Не опр.                 | 0.1                 | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.024                                    |
| Молибдаты и вольфраматы       |                     |                         |                     |                         |                           |                     |                                          |
| Вольфрамит                    | $7.7 \cdot 10^{-8}$ | Не опр.                 | $6.5 \cdot 10^{-8}$ | $6 \cdot 10^{-6}$       | Не опр.                   | $1 \cdot 10^{-6}$   | $7.8 \cdot 10^{-7}$                      |
| Повеллит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $3 \cdot 10^{-7}$       | Не опр.                   | $5.2 \cdot 10^{-8}$ | $4 \cdot 10^{-8}$                        |
| Шеелит                        | $3.8 \cdot 10^{-8}$ | $3.6 \cdot 10^{-6}$     | $5.9 \cdot 10^{-7}$ | $3.3 \cdot 10^{-5}$     | $3.2 \cdot 10^{-6}$       | $8.3 \cdot 10^{-6}$ | $6.5 \cdot 10^{-6}$                      |
| Вульфенит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $3 \cdot 10^{-8}$       | Не опр.                   | $5.2 \cdot 10^{-9}$ | $4 \cdot 10^{-9}$                        |
| Фосфаты                       |                     |                         |                     |                         |                           |                     |                                          |
| Ксенотим                      | $1 \cdot 10^{-5}$   | $3.6 \cdot 10^{-6}$     | $1 \cdot 10^{-5}$   | $1.3 \cdot 10^{-4}$     | $2.8 \cdot 10^{-5}$       | $4.6 \cdot 10^{-5}$ | $3.7 \cdot 10^{-5}$                      |
| Монацит                       | $3.8 \cdot 10^{-4}$ | $1.2 \cdot 10^{-4}$     | $3.4 \cdot 10^{-4}$ | 0.0028                  | 0.0014                    | 0.0016              | 0.0013                                   |
| Рабдофан                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $2.5 \cdot 10^{-6}$     | Не опр.                   | $4.3 \cdot 10^{-7}$ | $3.3 \cdot 10^{-7}$                      |
| Амблигонит                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $3.7 \cdot 10^{-7}$     | Не опр.                   | $6.4 \cdot 10^{-8}$ | $4.9 \cdot 10^{-8}$                      |
| Апатит                        | 0.014               | 0.016                   | 0.014               | 0.068                   | 0.18                      | 0.16                | 0.13                                     |
| Карбонат-апатит               | 0.041               | Не опр.                 | 0.035               | $3 \cdot 10^{-6}$       | Не опр.                   | $5.2 \cdot 10^{-6}$ | 0.0083                                   |
| Бритолит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $1.6 \cdot 10^{-5}$     | Не опр.                   | $2.8 \cdot 10^{-6}$ | $2.1 \cdot 10^{-6}$                      |
| Вивианит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-6}$       | Не опр.                   | $1.7 \cdot 10^{-7}$ | $1.3 \cdot 10^{-7}$                      |
| Вейншенкит                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $2.8 \cdot 10^{-7}$     | Не опр.                   | $4.8 \cdot 10^{-8}$ | $3.7 \cdot 10^{-8}$                      |
| Метаторбернит                 | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $5.6 \cdot 10^{-8}$     | Не опр.                   | $9.7 \cdot 10^{-9}$ | $7.4 \cdot 10^{-9}$                      |
| Островные силикаты            |                     |                         |                     |                         |                           |                     |                                          |
| Фенакит                       | $2.5 \cdot 10^{-7}$ | Не опр.                 | $2.1 \cdot 10^{-7}$ | $1.9 \cdot 10^{-5}$     | $4.7 \cdot 10^{-7}$       | $3.7 \cdot 10^{-6}$ | $2.9 \cdot 10^{-6}$                      |
| Форстерит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | 0.018                     | 0.015               | 0.011                                    |
| Оливин                        | Не опр.             | 0.29                    | 0.045               | 0.068                   | 0.027                     | 0.034               | 0.037                                    |
| Фаялит                        | Не опр.             | 0.0006                  | $9 \cdot 10^{-5}$   | Не опр.                 | 0.0061                    | 0.005               | 0.0039                                   |
| Тефроит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | 0.0022                    | 0.0018              | 0.0014                                   |
| Альмандин                     | 0.017               | 0.0003                  | 0.014               | 0.029                   | 1.33                      | 1.11                | 0.85                                     |
| Спессартин                    | Не опр.             | $2 \cdot 10^{-5}$       | $3 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.                 | 0.004                     | 0.0033              | 0.0026                                   |
| Гроссуляр                     | 0.0097              | Не опр.                 | 0.0082              | Не опр.                 | 0.0009                    | $7.5 \cdot 10^{-4}$ | 0.0025                                   |
| Андрадит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $3.8 \cdot 10^{-6}$     | 0.0019                    | 0.0016              | 0.0012                                   |
| Циркон                        | 0.0069              | 0.0037                  | 0.0064              | 0.013                   | 0.0106                    | 0.011               | 0.01                                     |
| Наэгит                        | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $2.5 \cdot 10^{-7}$     | Не опр.                   | $4.3 \cdot 10^{-8}$ | $3.3 \cdot 10^{-8}$                      |
| Циртолит                      | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-5}$       | $1.6 \cdot 10^{-6}$ | $4.6 \cdot 10^{-6}$     | $1.5 \cdot 10^{-6}$       | $2 \cdot 10^{-6}$   | $1.9 \cdot 10^{-6}$                      |
| Торит                         | $5 \cdot 10^{-5}$   | $6 \cdot 10^{-6}$       | $4.3 \cdot 10^{-5}$ | $1.9 \cdot 10^{-4}$     | $3.4 \cdot 10^{-5}$       | $6.1 \cdot 10^{-5}$ | $5.7 \cdot 10^{-5}$                      |

Продолжение табл. 1.14

| Минералы<br>и прочие вещества | Осадочный слой      |                         |                     | Гранитно-гнейсовый слой |                           |                      | Верхняя<br>часть континентальной<br>коры |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------------------|
|                               | Осадочные<br>породы | Вулканические<br>породы | Слой<br>в целом     | Магматические<br>породы | Метаморфические<br>породы | Слой<br>в целом      |                                          |
| U-торит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $6.5 \cdot 10^{-7}$     | Не опр.                   | $1.1 \cdot 10^{-7}$  | $8.6 \cdot 10^{-8}$                      |
| Силлиманит                    | 0.0082              | Не опр.                 | 0.0069              | $6.8 \cdot 10^{-5}$     | 0.49                      | 0.41                 | 0.31                                     |
| Андалузит                     | 0.0004              | Не опр.                 | 0.0003              | $1.2 \cdot 10^{-5}$     | 0.1                       | 0.083                | 0.063                                    |
| Дистен                        | 0.0033              | Не опр.                 | 0.0028              | $6.7 \cdot 10^{-5}$     | 0.034                     | 0.028                | 0.022                                    |
| Топаз                         | $2 \cdot 10^{-8}$   | $1 \cdot 10^{-5}$       | $1.6 \cdot 10^{-6}$ | $3.1 \cdot 10^{-5}$     | $7.2 \cdot 10^{-4}$       | 0.0006               | $4.6 \cdot 10^{-4}$                      |
| Ставролит                     | 0.0074              | Не опр.                 | 0.0062              | $4.9 \cdot 10^{-5}$     | 0.078                     | 0.065                | 0.051                                    |
| Сапфирин                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | 0.0035                    | 0.0029               | 0.0022                                   |
| Корнерупин                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | $9.4 \cdot 10^{-4}$       | $7.8 \cdot 10^{-4}$  | 0.0006                                   |
| Хондродит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $1.7 \cdot 10^{-4}$     | Не опр.                   | $2.9 \cdot 10^{-5}$  | $2.2 \cdot 10^{-5}$                      |
| Гумит                         | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | 0.0016                    | 0.0013               | 0.001                                    |
| Клиногумит                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | 0.0024                    | 0.002                | 0.0015                                   |
| Браунит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | 0.0043                    | 0.0035               | 0.0027                                   |
| Гадолинит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $3 \cdot 10^{-5}$       | Не опр.                   | $5.2 \cdot 10^{-6}$  | $4 \cdot 10^{-6}$                        |
| Титанит                       | 0.034               | 0.0005                  | 0.029               | 0.16                    | 0.245                     | 0.23                 | 0.18                                     |
| Лейкоксен                     | 0.047               | 0.0027                  | 0.04                | 0.0012                  | 0.009                     | 0.0077               | 0.015                                    |
| Мурманит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $1.3 \cdot 10^{-4}$     | Не опр.                   | $2.2 \cdot 10^{-5}$  | $1.7 \cdot 10^{-5}$                      |
| Дюмортьерит                   | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $6 \cdot 10^{-8}$       | Не опр.                   | $1 \cdot 10^{-8}$    | $7.6 \cdot 10^{-9}$                      |
| Тортвейтит                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $6 \cdot 10^{-8}$       | Не опр.                   | $1 \cdot 10^{-8}$    | $7.6 \cdot 10^{-9}$                      |
| Иттриалит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $1.2 \cdot 10^{-4}$     | Не опр.                   | $2.1 \cdot 10^{-5}$  | $1.6 \cdot 10^{-5}$                      |
| Велерит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $4 \cdot 10^{-10}$      | Не опр.                   | $1.7 \cdot 10^{-11}$ | $1.3 \cdot 10^{-11}$                     |
| Ловенит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $1.9 \cdot 10^{-6}$     | Не опр.                   | $3.3 \cdot 10^{-7}$  | $2.5 \cdot 10^{-7}$                      |
| Ринколит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $4 \cdot 10^{-8}$       | Не опр.                   | $6.9 \cdot 10^{-9}$  | $5.3 \cdot 10^{-9}$                      |
| Лампрофиллит                  | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $3.8 \cdot 10^{-5}$     | Не опр.                   | $6.6 \cdot 10^{-6}$  | $5 \cdot 10^{-6}$                        |
| Бертрандит                    | Не опр.             | $1.5 \cdot 10^{-6}$     | $2.3 \cdot 10^{-7}$ | $1.9 \cdot 10^{-5}$     | $1.1 \cdot 10^{-7}$       | $3.4 \cdot 10^{-6}$  | $2.7 \cdot 10^{-6}$                      |
| Лосонит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | 0.39                      | 0.32                 | 0.24                                     |
| Клиноцоизит                   | 0.029               | Не опр.                 | 0.025               | 0.0093                  | 0.054                     | 0.046                | 0.041                                    |
| Эпидот                        | 0.11                | 0.42                    | 0.16                | 0.13                    | 1.76                      | 1.48                 | 1.17                                     |
| Цоизит                        | Не опр.             | $1 \cdot 10^{-5}$       | $1.6 \cdot 10^{-6}$ | Не опр.                 | 0.048                     | 0.04                 | 0.031                                    |
| Ортит                         | $1.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.0004                  | $6 \cdot 10^{-5}$   | 0.0058                  | 0.0064                    | 0.0063               | 0.0048                                   |
| Чевкинит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $3.2 \cdot 10^{-6}$     | Не опр.                   | $5.5 \cdot 10^{-7}$  | $4.2 \cdot 10^{-7}$                      |
| Пумпеллиит                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | Не опр.                 | 0.023                     | 0.019                | 0.015                                    |
| Везувиан                      | 0.023               | Не опр.                 | 0.019               | $5.8 \cdot 10^{-6}$     | 0.035                     | 0.029                | 0.027                                    |
| Пренит                        | Не опр.             | 0.057                   | 0.0089              | Не опр.                 | 0.26                      | 0.22                 | 0.17                                     |
| <i>Кольцевые силикаты</i>     |                     |                         |                     |                         |                           |                      |                                          |
| Эвдиалит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $8.7 \cdot 10^{-5}$     | Не опр.                   | $1.5 \cdot 10^{-5}$  | $1.1 \cdot 10^{-5}$                      |
| Нептунит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $19 \cdot 10^{-6}$      | Не опр.                   | $3.3 \cdot 10^{-6}$  | $2.5 \cdot 10^{-6}$                      |
| Аксинит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $87 \cdot 10^{-6}$      | Не опр.                   | $15 \cdot 10^{-6}$   | $11 \cdot 10^{-6}$                       |
| Берилл                        | $3.8 \cdot 10^{-6}$ | $1.4 \cdot 10^{-6}$     | $3.4 \cdot 10^{-6}$ | $1.4 \cdot 10^{-4}$     | $2.2 \cdot 10^{-5}$       | $4.2 \cdot 10^{-5}$  | $3.3 \cdot 10^{-5}$                      |
| Нордит                        | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $4.2 \cdot 10^{-7}$     | Не опр.                   | $7.2 \cdot 10^{-8}$  | $5.5 \cdot 10^{-8}$                      |
| Кордиерит                     | Не опр.             | $4 \cdot 10^{-5}$       | $6 \cdot 10^{-6}$   | Не опр.                 | 0.014                     | 0.012                | 0.0088                                   |
| Турмалин                      | 0.0096              | $2 \cdot 10^{-5}$       | 0.0081              | 0.0025                  | 0.0032                    | 0.0031               | 0.0043                                   |
| Хризоколла                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.             | $2 \cdot 10^{-8}$       | Не опр.                   | $3.5 \cdot 10^{-9}$  | $2.7 \cdot 10^{-9}$                      |



Продолжение табл. 1.14

| Минералы<br>и прочие вещества | Осадочный слой      |                         |                      | Гранитно-гнейсовый слой |                           |                      | Верхняя<br>часть континентальной<br>коры |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------------------|
|                               | Осадочные<br>породы | Вулканические<br>породы | Слой<br>в целом      | Магматические<br>породы | Метаморфические<br>породы | Слой<br>в целом      |                                          |
| Цепочечные силикаты           |                     |                         |                      |                         |                           |                      |                                          |
| Пижонит                       | Не опр.             | 1.87                    | 0.29                 | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | 0.069                                    |
| Диопсид                       | 0.039               | 2.6                     | 0.44                 | 0.95                    | 0.39                      | 0.49                 | 0.48                                     |
| Геденбергит                   | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 0.013                     | 0.011                | 0.0082                                   |
| Салит                         | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 0.0038                  | 0.078                     | 0.065                | 0.05                                     |
| Сподумен                      | Не опр.             | 2.1·10 <sup>-6</sup>    | 3.3·10 <sup>-7</sup> | 7.2·10 <sup>-5</sup>    | 1.5·10 <sup>-7</sup>      | 1.3·10 <sup>-5</sup> | 1·10 <sup>-5</sup>                       |
| Жадеит                        | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 0.0046                    | 0.0038               | 0.0029                                   |
| Эгирин                        | Не опр.             | 0.59                    | 0.09                 | 0.19                    | 0.069                     | 0.09                 | 0.09                                     |
| Омфациит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 0.0019                  | Не опр.                   | 3.3·10 <sup>-4</sup> | 2.5·10 <sup>-4</sup>                     |
| Авгит                         | 0.0074              | 9.26                    | 1.45                 | 1.41                    | 1.07                      | 1.13                 | 1.21                                     |
| Энстатит                      | Не опр.             | 0.88                    | 0.14                 | 0.08                    | 0.0003                    | 0.014                | 0.044                                    |
| Бронзит                       | Не опр.             | 0.016                   | 0.0025               | 0.34                    | 0.031                     | 0.084                | 0.065                                    |
| Гиперстен                     | 0.0008              | 4.48                    | 0.7                  | 0.32                    | 0.34                      | 0.34                 | 0.43                                     |
| Куммингтонит                  | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 0.73                      | 0.6                  | 0.46                                     |
| Тремолит                      | 0.17                | 0.009                   | 0.14                 | Не опр.                 | 0.035                     | 0.029                | 0.055                                    |
| Актинолит                     | 0.039               | 0.18                    | 0.061                | Не опр.                 | 0.59                      | 0.49                 | 0.39                                     |
| Рибекит                       | Не опр.             | 0.021                   | 0.0033               | 0.0011                  | 0.26                      | 0.22                 | 0.17                                     |
| Арфведсонит                   | 0.0089              | 0.021                   | 0.011                | 0.0012                  | 5.4·10 <sup>-4</sup>      | 6.5·10 <sup>-4</sup> | 0.0031                                   |
| Глаукофан                     | Не опр.             | 0.0006                  | 9·10 <sup>-5</sup>   | Не опр.                 | 0.0023                    | 0.0019               | 0.0015                                   |
| Кроссит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 0.08                      | 0.066                | 0.051                                    |
| Гастингсит                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 0.072                   | 0.47                      | 0.4                  | 0.31                                     |
| Роговая обманка               | 0.55                | 3.86                    | 1.07                 | 1.84                    | 4.22                      | 3.81                 | 3.16                                     |
| Антофиллит                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 0.0053                    | 0.0044               | 0.0033                                   |
| Жедрит                        | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 0.008                     | 0.0066               | 0.0051                                   |
| Энигматит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 8.7·10 <sup>-4</sup>    | Не опр.                   | 1.5·10 <sup>-4</sup> | 1.1·10 <sup>-4</sup>                     |
| Волластонит                   | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 2.2·10 <sup>-8</sup>    | 8.9·10 <sup>-4</sup>      | 7.4·10 <sup>-4</sup> | 5.7·10 <sup>-4</sup>                     |
| Родонит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 5.3·10 <sup>-4</sup>      | 4.4·10 <sup>-4</sup> | 3.3·10 <sup>-4</sup>                     |
| Майзерит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 1.4·10 <sup>-6</sup>    | Не опр.                   | 2.4·10 <sup>-7</sup> | 1.8·10 <sup>-7</sup>                     |
| Рамзаит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 3.8·10 <sup>-5</sup>    | Не опр.                   | 6.6·10 <sup>-6</sup> | 5·10 <sup>-6</sup>                       |
| Слоистые силикаты             |                     |                         |                      |                         |                           |                      |                                          |
| Тальк                         | 0.0026              | Не опр.                 | 0.0022               | 7.6·10 <sup>-4</sup>    | 0.072                     | 0.06                 | 0.046                                    |
| Пирофиллит                    | 0.0052              | Не опр.                 | 0.0044               | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | 0.001                                    |
| Парагонит                     | 0.78                | Не опр.                 | 0.66                 | Не опр.                 | 0.64                      | 0.53                 | 0.56                                     |
| Мусковит                      | 3.39                | 0.72                    | 2.97                 | 0.84                    | 1.87                      | 1.69                 | 1.99                                     |
| Глауконит                     | 0.64                | Не опр.                 | 0.54                 | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.              | 0.13                                     |
| Фенгит                        | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | Не опр.                 | 0.061                     | 0.05                 | 0.039                                    |
| Флогопит                      | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 0.012                   | 0.018                     | 0.017                | 0.013                                    |
| Биотит                        | 3.57                | 6.16                    | 3.97                 | 5.84                    | 9.17                      | 8.59                 | 7.49                                     |
| Лепидолит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 1·10 <sup>-5</sup>      | 7.2·10 <sup>-6</sup>      | 7.7·10 <sup>-6</sup> | 5.8·10 <sup>-6</sup>                     |
| Циннвальдит                   | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 1.9·10 <sup>-5</sup>    | 1.4·10 <sup>-6</sup>      | 4.5·10 <sup>-6</sup> | 3.4·10 <sup>-6</sup>                     |
| Протолитионит                 | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 1.2·10 <sup>-6</sup>    | 8.8·10 <sup>-7</sup>      | 9.4·10 <sup>-7</sup> | 7.1·10 <sup>-7</sup>                     |
| Лепидомелан                   | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.              | 0.0019                  | 0.12                      | 0.1                  | 0.076                                    |
| Гидромусковит                 | 12.51               | Не опр.                 | 10.56                | Не опр.                 | 0.0054                    | 0.0045               | 2.51                                     |

| Минералы<br>и прочие вещества | Осадочный слой      |                         |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                           |                     | Верхняя<br>часть континентальной<br>коры |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|------------------------------------------|
|                               | Осадочные<br>породы | Вулканические<br>породы | Слой<br>в целом | Магматические<br>породы | Метаморфические<br>породы | Слой<br>в целом     |                                          |
| Гидробиотит                   | 2.39                | Не опр.                 | 2.02            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.48                                     |
| Стильпномелан                 | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | Не опр.                 | 0.045                     | 0.037               | 0.028                                    |
| Монтмориллонит                | 2.18                | Не опр.                 | 1.84            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.43                                     |
| Бейделлит                     | 0.78                | Не опр.                 | 0.66            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.16                                     |
| Нонтронит                     | 2.86                | Не опр.                 | 2.41            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.57                                     |
| Вермикулит                    | 0.27                | Не опр.                 | 0.23            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.054                                    |
| Пеннин                        | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | 0.13                    | 0.41                      | 0.36                | 0.27                                     |
| Клинохлор                     | 0.51                | Не опр.                 | 0.43            | Не опр.                 | 0.93                      | 0.77                | 0.69                                     |
| Рипидолит                     | 1.94                | 0.25                    | 1.68            | 1.36                    | 2.09                      | 1.96                | 1.89                                     |
| Шамозит                       | 2.74                | Не опр.                 | 2.31            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.55                                     |
| Тюрингит                      | Не опр.             | 0.75                    | 0.12            | Не опр.                 | 0.14                      | 0.12                | 0.12                                     |
| Клементит                     | Не опр.             | 0.11                    | 0.017           | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.004                                    |
| Хлоритоид                     | 0.0016              | Не опр.                 | 0.0014          | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | $3.3 \cdot 10^{-4}$                      |
| Каолинит                      | 1.28                | Не опр.                 | 1.08            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.26                                     |
| Сerpентин                     | Не опр.             | 0.015                   | 0.0023          | 0.064                   | 0.1                       | 0.094               | 0.072                                    |
| Гарниерит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | Не опр.                 | $2.1 \cdot 10^{-5}$       | $1.7 \cdot 10^{-5}$ | $1.3 \cdot 10^{-5}$                      |
| Гизингерит                    | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | Не опр.                 | $2.8 \cdot 10^{-5}$       | $2.3 \cdot 10^{-5}$ | $1.8 \cdot 10^{-5}$                      |
| Пальгорскит                   | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | Не опр.                 | $2.8 \cdot 10^{-4}$       | $2.3 \cdot 10^{-4}$ | $1.8 \cdot 10^{-4}$                      |
| <i>Каркасные силикаты</i>     |                     |                         |                 |                         |                           |                     |                                          |
| Нефелин                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | 0.047                   | Не опр.                   | 0.0081              | 0.0062                                   |
| Анальцит                      | Не опр.             | 0.18                    | 0.028           | $3.8 \cdot 10^{-5}$     | Не опр.                   | $6.6 \cdot 10^{-6}$ | 0.0066                                   |
| Анортит                       | 0.0019              | 0.63                    | 0.11            | 0.055                   | 0.0027                    | 0.012               | 0.033                                    |
| Битовнит                      | 0.1                 | 2.5                     | 0.47            | 0.33                    | 0.23                      | 0.25                | 0.3                                      |
| Лабрадор                      | 0.62                | 19.91                   | 3.62            | 2.52                    | 2.91                      | 2.84                | 3.02                                     |
| Андезин                       | 1.68                | 10.57                   | 3.06            | 9.01                    | 7.36                      | 7.64                | 6.56                                     |
| Олигоклаз                     | 3.51                | 3.56                    | 3.52            | 24.53                   | 16.2                      | 17.64               | 14.31                                    |
| Альбит                        | 2.8                 | 3.66                    | 2.93            | 2.41                    | 4.73                      | 4.33                | 4.00                                     |
| КПШ                           | 4.51                | 3.76                    | 4.39            | 19.52                   | 9.81                      | 11.49               | 9.81                                     |
| Санидин                       | Не опр.             | 1.67                    | 0.26            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.061                                    |
| Канкринит                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | $1.7 \cdot 10^{-4}$     | Не опр.                   | $2.9 \cdot 10^{-5}$ | $2.2 \cdot 10^{-5}$                      |
| Содалит                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | $4.9 \cdot 10^{-4}$     | Не опр.                   | $8.4 \cdot 10^{-5}$ | $6.4 \cdot 10^{-5}$                      |
| Гидросодалит                  | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | $1.9 \cdot 10^{-4}$     | Не опр.                   | $3.3 \cdot 10^{-5}$ | $2.5 \cdot 10^{-5}$                      |
| Нозеан                        | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | 0.0019                  | Не опр.                   | $3.3 \cdot 10^{-4}$ | $2.5 \cdot 10^{-4}$                      |
| Гельвин                       | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | $3.7 \cdot 10^{-5}$     | $8.9 \cdot 10^{-8}$       | $6.5 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-6}$                        |
| Скаполиты                     | Не опр.             | Не опр.                 | Не опр.         | Не опр.                 | 0.028                     | 0.023               | 0.018                                    |
| Натролит                      | 0.43                | 0.035                   | 0.37            | 0.0019                  | Не опр.                   | $3.3 \cdot 10^{-4}$ | 0.088                                    |
| Томсонит                      | Не опр.             | 0.006                   | 0.0009          | Не опр.                 | 0.094                     | 0.078               | 0.06                                     |
| <i>Неминеральные вещества</i> |                     |                         |                 |                         |                           |                     |                                          |
| Палагонит                     | Не опр.             | 0.47                    | 0.073           | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.017                                    |
| Стекло основное               | Не опр.             | 8.42                    | 1.31            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.31                                     |
| Стекло кислое                 | 0.002               | 0.84                    | 0.13            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.031                                    |
| C <sub>орг</sub>              | 0.57                | Не опр.                 | 0.48            | Не опр.                 | Не опр.                   | Не опр.             | 0.11                                     |

соединений – 0.11, сульфиды – 0.094, сульфаты – 0.071, кольцевые силикаты – 0.013, молибдаты и вольфраматы –  $7.3 \cdot 10^{-6}$ , самородные металлы –  $1.6 \cdot 10^{-6}$ . В верхней части континентальной коры эндогенных минералов 87.55, экзогенных – 11.52%. Минералы, являющиеся традиционными или весьма перспективными источниками химических элементов (кроме O и Si) и их соединений, составляют около 7.15% масс верхней части континентальной коры, в том числе, %: графит – 0.12, прочие самородные химические элементы –  $1.6 \cdot 10^{-6}$ , сульфиды – 0.094, оксиды (кроме оксидов Si) – 1.03, гидроксиды – 0.201, карбонаты – 4.893, сульфаты – 0.071, фосфаты – 0.14, молибдаты и вольфраматы –  $7.3 \cdot 10^{-6}$ ; силикаты Ti, Al, Mn и редких элементов – 0.6. Еще около 12% масс верхней части континентальной коры представлено перспективными для крупномасштабного освоения минералами: калиевыми шпатами, мусковитом, оливином, каолинитом. Реакционноспособных минералов (сульфиды, галогениды, карбонаты, фосфаты) в верхней части континентальной коры – 5.32%; минералов, опасных в экологическом отношении (сульфиды, флюорит и др.), – около 0.3%, реакционноспособных минералов наиболее токсичных элементов (Hg, Pb, As, U, Th, Be) – около  $1 \cdot 10^{-4}$  %.

Таким образом, при количественных минералогических анализах обычно учитывают частицы акцессорных минералов крупнее 10–100 мкм. Исключениями являются в основном данные, полученные методами фазового растворения. Поэтому среднее содержание большинства акцессорных минералов как в верхней части континентальной коры в целом, так и в слагающих ее горных породах следует рассматривать в качестве минимально возможного. Отметим минералы, данные о которых, вероятно, наиболее корректны: золото самородное (определялось преимущественно радиональным анализом); минералы, склонные к образованию относительно крупных кристалликов с ярко выраженной индивидуальностью свойств: рутил, циркон, альмандин, турмалин; акцессорные минералы щелочных пород. Состав сиенитов, особенно нефелиновых, изучен в значительной мере на примере проб из ореолов концентрации титана и редких элементов. Этим в той или иной степени компенсировано обычное преуменьшение содержания акцессорных минералов. Сюда же можно отнести бериллиевые минералы гранитоидов, на примере которых разрабатывалась методика хотя бы частичного учета «невидимых» микрочастиц (Григорьев, 1999).

### 1.2.5. Выводы

Определено среднее содержание 276 минералов и их разновидностей, а также трех неминеральных веществ в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах, в том числе 215 минералов и минеральных разновидностей, являющихся традиционными или перспективными источниками 62 химических элементов. Среднее содержание 66 породообразующих минералов скорректировано для приведения в соответствие со средним химическим составом верхней части континентальной коры и слагающих ее горных пород. Приводимые величины содержания остальных минералов преимущественно минимально возможные.

Установлено, что минералы, являющиеся традиционными или весьма перспективными источниками химических элементов (кроме O и Si) и их соединений, составляют около 7.15% от массы верхней части континентальной коры. Около 12% массы здесь представлено перспективными для крупномасштабного освоения минералами: калиевыми полевыми шпатами, мусковитом, оливином, каолинитом. Реакционноспособных минералов (сульфиды, галогениды, карбонаты, фосфаты) в верхней части континентальной коры 5.32%; минералов, наиболее опасных в экологическом отношении (сульфиды, флюорит и др.), около 0.3%; реакционноспособных минералов наиболее токсичных элементов (Hg, Pb, As, U, Th, Be) – около  $1 \cdot 10^{-4}$  %.

Осадочные породы наиболее богаты минералами, являющимися традиционными или перспективными источниками химических элементов, но они же богаче минералами, реакционноспособными и опасными в экологическом отношении. Наиболее бедны ортометаморфические породы.

## Глава 2

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА И ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

---

#### 2.1. ВОДОРОД, НАТРИЙ, КАЛИЙ

##### 2.1.1. Средние содержания и распределение масс H, Na, K в верхней части континентальной коры

Приводимые в табл. 2.1 средние содержания Na и K в горных породах соответствуют опубликованным ранее (Григорьев, 2003). В большинстве горных пород они приняты по А.Б. Ронову и др. (1990) с небольшими поправками, для гранитов и гранодиоритов приняты данные А.А. Беуса (1981). Средние содержания Na, K в гранито-гнейсах определены по данным о химическом составе выделенной А.Б. Роновым с коллегами (1990) ассоциации гранитоидов и гранито-гнейсов и о химическом составе гранитоидов по А.А. Беусу (1981). При определении средних содержаний Na, K в метаридитах и метаандезитах использованы заимствованные из литературы данные преимущественно по докембрийским и палеозойским метавулканикам Балтийского щита, Урала и Алтая.

Данные о средних содержаниях H в горных породах, кроме вулканитов осадочного слоя, первоначально были заимствованы из отмеченных выше первоисточников. Среднее содержание H в вулканитах рассчитано по опубликованным в литературе результатам анализов вулканогенных пород преимущественно с Курильских островов, Камчатки, Японии и побережья Охотского моря. Но оказалось, что значения как заимствованные у А.Б. Ронова с коллегами (1990) и у А.А. Беуса (1981), так и полученные автором, не вполне соответствуют среднему минеральному составу горных пород. Корректировка минерального состава этих объектов по результатам синхронного расчета минеральных балансов O, Si, Al, Fe, Na, K, Mg, Ca не привела к приемлемому уровню этого несоответствия. Главная причина заключается в том, что при химических анализах горных пород, особенно осадочных и метаморфических, часто имело место некоторое преувеличение содержания  $\text{H}_2\text{O}^+$  за счет преуменьшения содержания  $\text{H}_2\text{O}^-$ . Поэтому часть чисел средних содержаний H была скорректирована расчетом минеральных балансов этого элемента. Условие – сумма долей масс H, установленных в минералах данной горной породы, не может отличаться от массы, установленной при анализе этой горной породы, не больше чем на 5%. Значения среднего содержания H (исходные – первые цифры и скорректированные – вторые цифры), %: пески и песчаники – 0.35 и 0.28; глины и

Таблица 2.1

**Среднее содержание и распределение масс Н, Na, К (%) в ассоциации  
горных пород верхней части континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород, % | Среднее содержание |             |             | Доли масс    |              |              |
|-------------------------------------------|----------------|--------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
|                                           |                | Н                  | Na          | К           | Н            | Na           | К            |
| Пески и песчаники                         | 5.11           | 0.28               | 1.39        | 1.76        | 8.57         | 3.43         | 4.03         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4           | 0.44               | 1.02        | 2.73        | 27.4         | 5.13         | 12.73        |
| Карбонатные породы                        | 3.85           | 0.083              | 0.22        | 0.46        | 1.91         | 0.41         | 0.79         |
| Кремнистые породы                         | 0.33           | 0.16               | 0.33        | 0.91        | 0.32         | 0.05         | 0.13         |
| Эвапориты                                 | 0.26           | 0.18               | 28.64       | 0.22        | 0.28         | 3.6          | 0.03         |
| Кислые вулканы                            | 0.44           | 0.079              | 2.58        | 3.65        | 0.21         | 0.55         | 0.72         |
| Средние вулканы                           | 1.13           | 0.088              | 2.72        | 1.49        | 0.59         | 1.49         | 0.76         |
| Основные вулканы                          | 2.11           | 0.09               | 1.94        | 0.77        | 1.14         | 1.98         | 0.73         |
| Граниты                                   | 8.21           | 0.058              | 2.69        | 3.58        | 2.85         | 10.67        | 13.18        |
| Гранодиориты                              | 3.38           | 0.09               | 2.74        | 2.52        | 1.82         | 4.47         | 3.82         |
| Базиты                                    | 1.5            | 0.16               | 1.93        | 0.69        | 1.44         | 1.4          | 0.46         |
| Сиениты                                   | 0.05           | 0.063              | 3.59        | 5.78        | 0.02         | 0.09         | 0.13         |
| Ультрабазиты                              | 0.05           | 0.33               | 0.59        | 0.29        | 0.1          | 0.01         | 0.01         |
| Метапесчаники                             | 2.92           | 0.14               | 1.55        | 1.97        | 2.45         | 2.19         | 2.58         |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56          | 0.16               | 2           | 2.07        | 29.28        | 29.53        | 28.37        |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13           | 0.15               | 0.19        | 0.34        | 1.01         | 0.1          | 0.17         |
| Железистые породы                         | 0.38           | 0.09               | 0.96        | 0.41        | 0.21         | 0.18         | 0.07         |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21          | 0.11               | 2.62        | 2.8         | 15.29        | 29.38        | 29.14        |
| Метариолиты                               | 0.66           | 0.15               | 2.93        | 1.55        | 0.59         | 0.93         | 0.46         |
| Метаандезиты                              | 1.03           | 0.19               | 2.96        | 1.14        | 1.17         | 1.47         | 0.53         |
| Метабазиты                                | 3.29           | 0.17               | 1.83        | 0.7         | 3.35         | 2.91         | 1.03         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>     | <b>0.167</b>       | <b>2.07</b> | <b>2.23</b> | <b>100</b>   | <b>99.97</b> | <b>99.87</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95          | 0.322              | 1.31        | 1.98        | 38.48        | 12.62        | 17.71        |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68           | 0.088              | 2.26        | 1.34        | 1.94         | 4.02         | 2.21         |
| <b>Осадочный слой</b>                     | <b>23.63</b>   | <b>0.286</b>       | <b>1.46</b> | <b>1.88</b> | <b>40.42</b> | <b>16.64</b> | <b>19.92</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19          | 0.079              | 2.61        | 2.98        | 6.23         | 16.64        | 17.6         |
| Параметаморфиты                           | 34.99          | 0.157              | 1.89        | 1.99        | 32.95        | 32           | 31.19        |
| Ортометаморфиты                           | 28.19          | 0.12               | 2.55        | 2.46        | 20.4         | 34.69        | 31.16        |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой</b>            | <b>76.37</b>   | <b>0.13</b>        | <b>2.26</b> | <b>2.33</b> | <b>59.58</b> | <b>83.33</b> | <b>79.95</b> |

глинистые сланцы – 0.43 и 0.44; карбонатные породы – 0.27 и 0.083; кремнистые породы – 0.21 и 0.16; осадочные породы в целом – 0.37 и 0.322; кислые вулканы – 0.092 и 0.079; основные вулканы – 0.094 и 0.09; вулканы в целом – 0.092 и 0.088; базиты – 0.17 и 0.16; сиениты – 0.066 и 0.063; ультрабазиты – 0.39 и 0.33; магматические породы в целом – 0.08 и 0.079; метаандезиты – 0.2 и 0.19; верхняя часть континентальной коры – 0.18 и 0.167.

**Водород.** Среднее содержание Н максимально в глинах и глинистых сланцах (см. табл. 2.1), затем следуют ультрабазиты (результат совместного учета этих пород с преобладающими продуктами их метаморфизма), пески и песчаники. Установлено, что из всей массы Н, находящейся в верхней части континентальной коры, 71.43% сконцентрировано в осадочных породах и продуктах их метаморфизма. Это избыточный элемент. Среднее его содержание в осадочных породах 0.322% втрое больше того (0.106%), которое могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (расчет изоалюминиевым методом). Причина – принос магматических и метаморфических пород из атмосферы и гидросферы в процессе выветривания.

**Натрий.** Самое высокое среднее содержание Na в эвапоритах. Среди более распространенных горных пород наибольшим средним содержанием Na характеризуются преимущественно щелочные, кислые, средние магматические породы и продукты их метаморфизма (см. табл. 2.1). Главные носители Na метаморфические породы. Здесь сосредоточено 66.69% его массы. Na – недостаточный элемент. Среднее его содержание в осадочных породах 1.31% несколько меньше того (1.85%), которое могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава без выноса вещества. Причина – вынос в процессе выветривания магматических и метаморфических пород в океан.

**Калий.** Среднее содержание К максимально в кислых вулканитах и гранитах (см. табл. 2.1). Затем следуют: гранито-гнейсы, гранодиориты, глины и глинистые сланцы и продукты их метаморфизма. Главные носители К метаморфические породы. Здесь сосредоточено 62.35% его массы. Среднее его содержание в осадочных породах (1.97%) практически соответствует тому, которое могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (1.91%).

### **2.1.2. Средний минеральный баланс Н, Na, К в верхней части континентальной коры**

Основа расчетов: среднее содержание Н, Na и К в верхней части континентальной коры, ее средний минеральный состав, среднее содержание Н, Na и К в эталонных разностях минералов. О среднем содержании Н, Na и К в верхней части континентальной коры сказано выше, ее средний минеральный состав определен на основе данных о среднем минеральном составе важнейших горных пород, заимствованных из опубликованных в литературе результатов количественных минералогических анализов. Полученные цифры скорректированы для приведения в соответствие со средним химическим составом горных пород. Исключение – эвапориты, для которых выполнен пересчет среднего химического состава (Ронов и др., 1990) на минеральный. Основа – качественные данные о минеральном составе эвапоритов Приуралья, Поволжья и Тимана (Кольцова, Яржемский, 1969; Лобанова, 1969; Юшкин, 1989).

**Водород.** В верхней части континентальной коры распределение массы Н по минералам, характеризующимся разным содержанием Н, близко к би-

Таблица 2.2

**Средний минеральный баланс Н (%) в верхней части континентальной коры**

| Интервалы<br>содержаний Н<br>в минералах | Доли масс Н в минералах                                                              | Суммы долей масс<br>Н |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 0–0.2                                    | Полевые шпаты – 6.52, амфиболы – 3.6, опал – 1.01, прочие – 1.43                     | 12.56                 |
| 0.2–0.4                                  | Биотит – 16.59, эпидот – 1.54, прочие – 1.2                                          | 19.33                 |
| 0.4–0.6                                  | Мусковит – 6.08, парагонит – 1.74, гидробиотит – 1.64, прочие – 0.97                 | 10.43                 |
| 0.6–0.8                                  | Гидромусковит – 12.78, глауконит – 0.57                                              | 13.35                 |
| 0.8–1                                    | Нонтронит – 3.21, монтмориллонит – 2.16, дистен – 0.28                               | 5.65                  |
| 1–1.2                                    | Шамозит – 3.89, тюрингит – 0.81, гётит – 0.57                                        | 5.27                  |
| 1.2–1.4                                  | Рипидолит – 14.94, клинохлор – 5.08, пеннин – 2.27, лосонит – 1.78, бейделлит – 1.18 | 25.25                 |
| 1.4–1.6                                  | Каолинит – 2.44, серпентин – 0.68, томсонит – 0.54                                   | 3.66                  |
| 0–1.6                                    | Всего                                                                                | 95.50                 |

модальному (табл. 2.2). Однако группы минералов-носителей частично перекрываются. Интервала нехарактерной концентрации практически нет (рис. 1, А). Первая группа минералов-носителей характеризуется содержанием Н < 1% (модальное содержание – 0.2–0.4%). Здесь главные минералы-носители Н слюды и гидрослюды, меньшую роль играют полевые шпаты. В минералах-носителях первой группы находится 61.32% той массы Н, которая, несомненно, относится к верхней части континентальной коры, а не к гидросфере. Вторая группа (максиминералы) характеризуется содержанием Н – 1–1.6% (модальное содержание 1.2–1.4%). Это преимущественно хлориты. В максиминералах сконцентрировано 34.18% массы Н.

**Натрий.** В верхней части континентальной коры распределение массы Na по минералам, характеризующимся разным содержанием Na, сложное (рис. 1, Б). Выделяются три группы минералов-носителей. Первая представлена преимущественно ненатриевыми минералами и вулканическим стеклом с содержанием Na < 3%, в них сосредоточено 11.58% массы Na. Вторая представлена минералами с содержанием Na 3–9 % (преимущественно плагиоклазами), в которых сконцентрировано 85.73% массы Na. Эти две группы минералов-носителей частично перекрываются. Интервала нехарактерной концентрации между ними нет. Третья группа представлена галитом. Она отделена от первых двух огромным интервалом нехарактерной концентрации (табл. 2.3). Согласно приблизительно-му расчету (Григорьев, 1999), минимальное для максиминералов содержание Na – 8.9% почти соответствует началу интервала нехарактерной концентрации. Таким образом, из относительно распространенных минералов к натриевым максиминералам относится только галит. В нем сконцентрировано 3.58% всей массы Na, имеющейся в верхней части континентальной коры.

**Калий.** В верхней части континентальной коры распределение массы К по минералам, характеризующимся разным содержанием К, сложное,



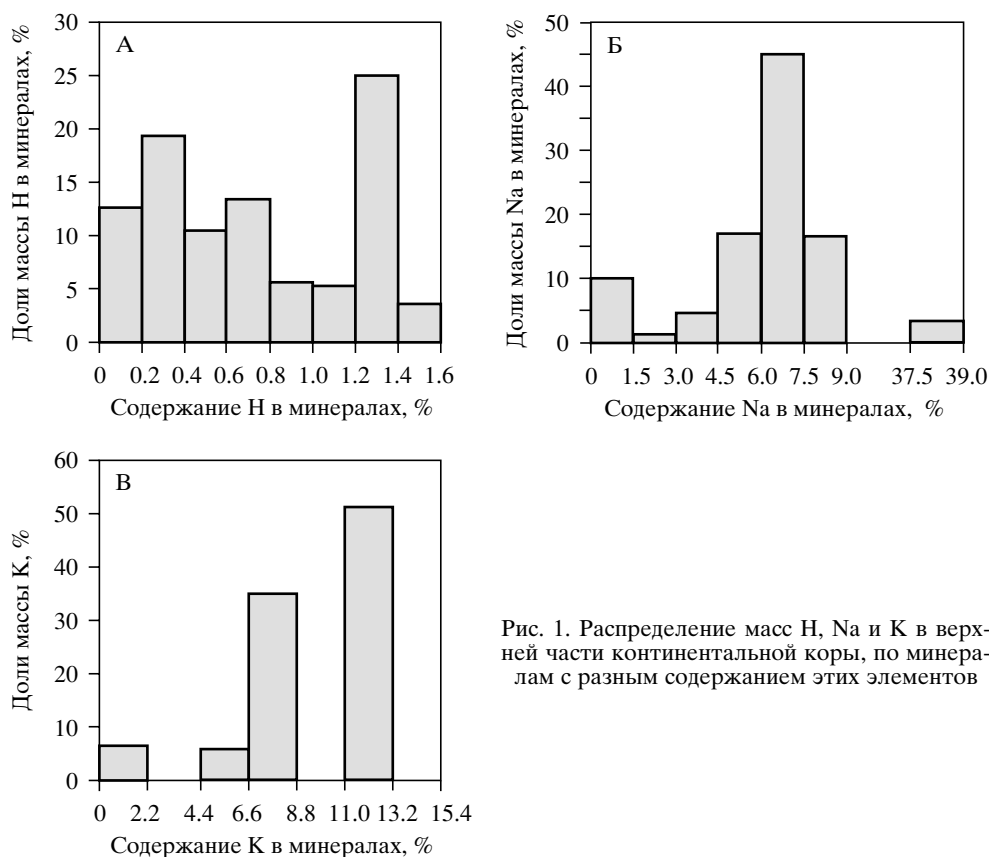


Рис. 1. Распределение масс Н, Na и К в верхней части континентальной коры, по минералам с разным содержанием этих элементов

но приближающееся к бимодальному (рис. 1, В). Больше 93% массы К сконцентрировано в двух группах минералов. Одна из них, характеризующаяся средним содержанием К 4.4–8.8%, представлена слюдами и гидрослюдами (табл. 2.4), другая – калиевыми полевыми шпатами со средним содержанием К 11–13.2%. Минералы обеих групп характеризуются значительными вариациями содержания К. Учет этих вариаций в рамках модели А.Б. Ронова и др. (1990) вряд ли возможен. При расчетах предполагалось, что среднее содержание К в отмеченных минералах соответствует тому, которое установлено в эталонных образцах разностей, наиболее распространенных, по предположениям автора. Данные о таких образцах заимствованы из справочников, что необходимо учитывать при обсуждении результатов расчетов. Остальная часть массы К преимущественно рассеяна в чужих минералах (в основном плагиоклазах). Сюда же относится гидробиотит. В минералах-носителях этой группы сосредоточено всего 6.4% массы К. В еще одной второстепенной группе заметной является только роль сильвина, но и она мала. Согласно приблизительному расчету (Григорьев, 1999), граничное для калиевых максиминералов содержание К 10%. Эта цифра соответствует интервалу нехарактерной концент-

Таблица 2.3

**Средний минеральный баланс Na (%) в верхней части континентальной коры**

| Интервалы содержаний Na в минералах | Доли масс Na в минералах                                                           | Суммы долей масс Na |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 0–1.5                               | Калиевые полевые шпаты – 5.69, биотит – 1.3, роговая обманка – 1.24, прочие – 2.25 | 10.24               |
| 1.5–3                               | Стекло основное – 0.35, прочие – 0.99                                              | 1.34                |
| 3–4.5                               | Лабрадор – 4.9, прочие – 0.1                                                       | 5                   |
| 4.5–6                               | Андезин – 15.8, парагонит – 1.24, прочие – 0.37                                    | 17.41               |
| 6–7.5                               | Олигоклаз – 45.1                                                                   | 45.1                |
| 7.5–9                               | Альбит – 16.5, эгирин – 0.38                                                       | 16.88               |
| 9–37.5                              | ИНК*                                                                               | 0                   |
| 37.5–39                             | Галит – 3.58                                                                       | 3.58                |
| 0–39                                | Всего                                                                              | 99.55               |

\* Интервал нехарактерной концентрации.

Таблица 2.4

**Средний минеральный баланс K (%) в верхней части континентальной коры**

| Интервалы содержаний K в минералах | Доли масс K в минералах                                             | Суммы долей масс K |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 0–2.2                              | Олигоклаз – 3.21, андезин – 1.18, гидробиотит – 0.46, прочие – 1.55 | 6.4                |
| 2.2–4.4                            | ИНК                                                                 | 0                  |
| 4.4–6.6                            | Гидромусковит – 5.85, глауконит – 0.31, лепидомелан – 0.22          | 6.16               |
| 6.6–8.8                            | Биотит – 27.5, мусковит – 7.5                                       | 35                 |
| 8.8–11                             | ИНК фенгит – 0.16                                                   | 0.16               |
| 11–13.2                            | Калиевые полевые шпаты – 51.9                                       | 51.9               |
| 13.2–15.4                          | Карналлит – 0.0008                                                  | 0.0008             |
| 15.4–50.6                          | ИНК                                                                 | 0                  |
| 50.6–52.8                          | Сильвин                                                             | 0.016              |
| 0–52.8                             | Всего                                                               | 99.6368            |

рации между двумя главными группами минералов-носителей. На данном этапе исследования максиминералами можно считать калиевые полевые шпаты, карналлит и сильвин. С ними связано около 51.92% всей массы K. Причем цифра эта несколько преувеличена, поскольку не все калиевые полевые шпаты характеризуются содержанием K > 10%. Судя по полученным данным, при резком увеличении потребности в K наиболее перспективными его источниками могут стать калиевые полевые шпаты. Однако по содержанию K слюды (особенно мусковит) в целом мало отличаются от полевых шпатов. Не исключено, что при комплексном использовании слюды могут оказаться более выгодными.

### 2.1.3. Выводы

Установлено, что из всей массы Н, химически связанного в минералах, 71.43% сконцентрировано в осадочных породах, в максиминералах – 34.19 масс Н. Главные максиминералы хлориты.

Больше половины масс Na и K находится в метаморфических породах. Главный натриевый максиминерал галит. В нем сконцентрировано 3.58% масс Na. Главные калиевые максиминералы калиевые полевые шпаты, по расчету в них сконцентрировано до 51.9% масс K. Эта цифра, вероятно, несколько преувеличена. В главном промышленном калиевом минерале сильвине сконцентрировано всего 0.019% масс K.

### 2.2. ЛИТИЙ

Расчеты проведены по литературным данным о горных породах в основном с территории бывшего СССР (> 8000 определений содержания Li, > 2500 определений содержания акцессорных минералов, около 70 минеральных балансов Li).

#### 2.2.1. Среднее содержание и распределение масс Li в верхней части континентальной коры

При расчете (табл. 2.5) исключены результаты изучения рудных полей редкометалльных месторождений, а также данные из таких публикаций, где осадочные и магматические породы не разделены с продуктами их метаморфизма. Главные источники данных: осадочные породы (Мизенс и др., 2006; Солодов и др., 1980); вулканиты осадочного слоя (Карапетян, Меликсетян, 1981; Лебедева, 1981; Лебедева, Шаткова, 1975; Леонова, Кирсанов, 1974; Нестеренко, Фролова, 1965; Пополитов, Волинец, 1981; Солодов и др., 1980; Хворостов, Зайцев, 1983); магматические породы гранитно-гнейсового слоя (Антипин, 1977; Воронцов, Лин, 1966; Грабежев, 1981; Залашкова, 1960; Злобин, Лебедев, 1960; Коваленко, Пополитов, 1970; Корнев и др., 1974; Костин, 1985; Ляхович, Гурбанов, 1992; Одикадзе, 1968; Павленко и др., 1974; Самаркин, Самаркина, 1981); метаморфические породы (Буданова, 1991; Кременецкий, Овчинников, 1986; Кременецкий и др., 1990; Макрыгина и др., 1992, 1994; Макрыгина, Петрова, 1996; Петров, Макрыгина, 1975; Петрова, Левицкий, 1984; Петрова и др., 2000; Петрова, Макрыгина, 1994). Новые значения среднего содержания Li в горных породах (см. табл. 2.5) близки к опубликованным раньше (Григорьев, 2003).

Среднее содержание Li в верхней части континентальной коры по новым данным – 0.0033%, что превышает данные, приводившиеся в последние годы другими авторами, – 0.002–0.0022% (Rudnik, Gao, 2004; Wedepohl, 1995), но близко к значению 0.003%, приведенному раньше (Григорьев, 2003) и практически соответствует 0.0032% – среднему содержанию Li в земной коре по А.П. Виноградову (1962). Максимальное среднее содержание Li установлено в глинистых породах и продуктах их ме-

Таблица 2.5

**Среднее содержание и распределение масс Li, Rb, Cs (%) в ассоциации  
горных пород верхней части континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород  | Среднее содержание, $n \cdot 10^{-4} \%$ |            |            | Доли масс    |              |               |
|-------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|------------|------------|--------------|--------------|---------------|
|                                           |              | Li                                       | Rb         | Cs         | Li           | Rb           | Cs            |
| Пески и песчаники                         | 5.11         | 29                                       | 64         | 8.4        | 4.49         | 3.34         | 7.8           |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4         | 54                                       | 133        | 13         | 17.02        | 14.11        | 24.58         |
| Карбонатные породы                        | 3.85         | 18                                       | 26         | 2.8        | 2.1          | 1.02         | 1.96          |
| Кремнистые породы                         | 0.33         | 4                                        | 52         | 3.8        | 0.04         | 0.18         | 0.23          |
| Эвапориты                                 | 0.26         | 8                                        | 34         | 1.2        | 0.06         | 0.09         | 0.06          |
| Кислые вулканиты                          | 0.44         | 27                                       | 135        | 15         | 0.36         | 0.61         | 1.2           |
| Средние вулканиты                         | 1.13         | 21                                       | 62         | 6.7        | 0.72         | 0.72         | 1.38          |
| Основные вулканиты                        | 2.11         | 19                                       | 28         | 2.8        | 1.21         | 0.6          | 1.07          |
| Граниты                                   | 8.21         | 34                                       | 205        | 7.3        | 8.46         | 17.17        | 10.9          |
| Гранодиориты                              | 3.38         | 23                                       | 90         | 3.6        | 2.36         | 3.1          | 2.21          |
| Базиты                                    | 1.5          | 15                                       | 29         | 2.5        | 0.68         | 0.44         | 0.68          |
| Сиениты                                   | 0.05         | 22                                       | 174        | 7          | 0.03         | 0.09         | 0.06          |
| Ультрабазиты                              | 0.05         | 1.2                                      | 4          | 0.1        | < 0.01       | < 0.01       | < 0.01        |
| Метапесчаники                             | 2.92         | 26                                       | 57         | 2          | 2.3          | 1.7          | 1.06          |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56        | 38                                       | 105        | 3.9        | 35.19        | 32.74        | 21.67         |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13         | 15                                       | 26         | 2          | 0.51         | 0.3          | 0.41          |
| Железистые породы                         | 0.38         | 2                                        | 15         | 0.3        | 0.02         | 0.06         | 0.02          |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21        | 3                                        | 90         | 5          | 21.1         | 21.32        | 21.1          |
| Метариолиты                               | 0.66         | 26                                       | 130        | 7          | 0.52         | 0.88         | 0.84          |
| Метаандезиты                              | 1.03         | 26                                       | 60         | 4          | 0.81         | 0.63         | 0.75          |
| Метабазиты                                | 3.29         | 20                                       | 19         | 3.4        | 1.99         | 0.64         | 2.03          |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>   | <b>33</b>                                | <b>98</b>  | <b>5.5</b> | <b>99.97</b> | <b>99.74</b> | <b>100.01</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95        | 39                                       | 92         | 9.5        | 23.71        | 18.74        | 34.63         |
| Вулканиты осадочного слоя                 | 3.68         | 21                                       | 51         | 5.4        | 2.29         | 1.93         | 3.65          |
| <b>Осадочный слой</b>                     | <b>23.63</b> | <b>36</b>                                | <b>86</b>  | <b>8.9</b> | <b>26.00</b> | <b>20.67</b> | <b>38.28</b>  |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19        | 29                                       | 154        | 5.8        | 11.53        | 20.8         | 13.85         |
| Параметаморфиты                           | 34.99        | 36                                       | 98         | 3.6        | 38.02        | 34.8         | 23.16         |
| Ортометаморфиты                           | 28.19        | 29                                       | 81         | 4.8        | 24.42        | 23.47        | 24.72         |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой</b>            | <b>76.37</b> | <b>32</b>                                | <b>101</b> | <b>4.4</b> | <b>73.97</b> | <b>79.07</b> | <b>61.73</b>  |

таморфизма, коэффициенты концентрации, соответственно, 1.64 и 1.15. Больше половины массы Li (61.73%) сконцентрировано в осадочных и параметаморфических породах. Литий избыточный элемент. Его среднее содержание в осадочных породах континентальной коры (0.0039%) в полтора раза больше того, которое должно быть в продуктах выветривания гранитно-гнейсового слоя современного состава – 0.0026% (расчет изоалюминиевым методом).

### **2.2.2. Вариации концентрации масс Li в горных породах**

Основа расчета – частота встречаемости проб с разным содержанием Li. Главные источники данных перечислены выше. Использованы результаты количественных анализов отдельных проб горных пород и средние из 2–10 определений. Обобщения результатов больше чем 10 анализов учитывались, как правило, только при наличии данных, позволяющих приблизительно определить количество проб с разным содержанием Li. Установлено, что больше половины масс большинства горных пород характеризуется средним и низким содержанием Li (табл. 2.6). Исключение – глинистые породы (глины, глинистые сланцы, аргиллиты, мергели с содержанием карбонатов < 50%). Больше половины их масс характеризуется повышенным содержанием Li. По характеру распределения масс Li наиболее интересны две пары главных горных пород (табл. 2.6). Первая – глинистые породы и продукты их метаморфизма. Здесь больше половины масс Li слабо сконцентрировано в участках с повышенным его содержанием. В участках с высоким содержанием Li сконцентрировано соответственно 7.2 и 8.2% его масс. Роль же участков с низким содержанием Li мала. Вторая пара – граниты и гранито-гнейсы. Здесь распределение Li похожее, но более контрастное. Роль участков как с низким, так и с высоким содержанием Li больше. В последних сконцентрировано, соответственно, 16.9 и 17.5% масс Li. Все остальные горные породы характеризуются локализацией основной массы Li в участках со средним и низким его содержанием.

### **2.2.3. О минеральном балансе Li и вероятной роли максиминералов как его носителей**

Собственно литиевые минералы редки. Вариации роли пороодообразующих минералов как концентраторов и носителей Li количественно определены только на примере некоторых магматических пород. В гранитах и гранодиоритах главный концентратор и носитель Li биотит (табл. 2.7, 2.8). Концентраторы Li мусковит, хлориты, амфиболы, иногда – пироксены и эпидот, редко – турмалин, берилл. Но роль их как носителей Li значительна только в отдельных случаях. Важнейшие носители Li полевые шпаты обычно не являются его концентраторами. В сиенитах ситуация похожая (см. табл. 2.8), но здесь, в целом, больше Li находится в амфиболах и пироксенах. В кислых вулканогенных породах Li находится преимущественно в стекле и продуктах его раскристаллизации (табл. 2.9). В редкометалльных гранитоидах при валовом содержании Li 0.11–0.77% большая часть его масс сконцентрирована в собственных минералах (табл. 2.10).

При количественных минералогических анализах вулканитов, гранитов, гранодиоритов и гранито-гнейсов некоторые исследователи учитывали сподумен (Арсеньева и др., 1969; Ляхович, 1967; Руб, 1970). К сожалению, данных мало и они не сопровождаются сведениями о содержании Li в исследованных пробах горных пород. Среднее содержание сподумена в этих горных породах (табл. 2.11) рассчитано с учетом общего количест-

Таблица 2.6  
Соотношение масс горных пород с разным содержанием и распределение в них масс Li, %

| Горные породы            | Среднее содержание Li | Количество проб | Доли масс горных пород с содержанием Li |                     |                        |                 | Доли масс Li в горных породах с его содержанием |                     |                        |                 |
|--------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-------------------------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------|
|                          |                       |                 | низким < 0.002                          | средним 0.002–0.005 | повышенным 0.005–0.008 | высоким > 0.008 | низким < 0.002                                  | средним 0.002–0.005 | повышенным 0.005–0.008 | высоким > 0.008 |
| Глины и глинистые сланцы | 0.0054                | 895             | 2.1                                     | 43.8                | 52                     | 2.1             | 0.5                                             | 37.9                | 54.4                   | 7.2             |
| Парагнейсы и парасланцы  | 0.0038                | 993             | 24.4                                    | 41.2                | 32.6                   | 1.8             | 6.6                                             | 33.9                | 51.3                   | 8.2             |
| Граниты                  | 0.0034                | 915             | 40.9                                    | 38.2                | 16.5                   | 4.4             | 12.1                                            | 39.4                | 31.6                   | 16.9            |
| Гранито-гнейсы           | 0.003                 | 201             | 48.3                                    | 35.3                | 11.9                   | 4.5             | 19.7                                            | 35.9                | 26.9                   | 17.5            |
| Пески и песчаники        | 0.0029                | 1307            | 6.1                                     | 92.1                | 1.6                    | 0.2             | 2.9                                             | 93.2                | 3.3                    | 0.6             |
| Кислые вулканы           | 0.0027                | 516             | 40.9                                    | 52.3                | 5.1                    | 1.7             | 20.9                                            | 57.6                | 12.1                   | 9.4             |
| Гранодиориты             | 0.0023                | 317             | 49.2                                    | 47                  | 2.5                    | 1.3             | 25.2                                            | 62.4                | 6.8                    | 5.6             |
| Средние вулканы          | 0.0021                | 372             | 38.7                                    | 60.8                | Не обн.                | 0.5             | 22.6                                            | 74                  | Не обн.                | 3.4             |
| Метапесчаники            | 0.0026                | 242             | 27.7                                    | 69                  | 2.1                    | 1.2             | 10.9                                            | 76.2                | 5.1                    | 7.8             |
| Метабазиты               | 0.002                 | 978             | 51.6                                    | 46.1                | 1.9                    | 0.4             | 36.7                                            | 54                  | 6.7                    | 2.6             |
| Основные вулканы         | 0.0019                | 451             | 68.3                                    | 26.8                | 3.8                    | 1.1             | 44.9                                            | 35.9                | 11.9                   | 7.3             |
| Карбонатные              | 0.0018                | 517             | 71.9                                    | 26.7                | 1                      | 0.4             | 49.8                                            | 43.4                | 3.1                    | 3.7             |

Таблица 2.7

Минеральный баланс Li в гранитах

| Минералы               | 25   |         |      | А          |              |              | 349a/65  |               |             | 825/65    |               |             |
|------------------------|------|---------|------|------------|--------------|--------------|----------|---------------|-------------|-----------|---------------|-------------|
|                        | 1    | 2       | 3    | 1          | 2            | 3            | 1        | 2             | 3           | 1         | 2             | 3           |
| Кварц                  | 26.3 | 0.00018 | 4.7  | 33.9       | 0.0002       | 1.36         | 30       | 0.0008        | 1.8         | 25        | 0.0005        | 0.5         |
| Мусковит               | 0    | —       | —    | 0.0        | —            | —            | 0        | —             | —           | 2         | <b>0.3523</b> | <b>27.8</b> |
| Биотит                 | 4.7  | 0.017   | 79.9 | <b>4.7</b> | <b>0.092</b> | <b>86.48</b> | <b>3</b> | <b>0.4262</b> | <b>84.3</b> | <b>10</b> | <b>0.1543</b> | <b>61</b>   |
| Плагиоклазы            | 50.6 | 0.0002  | 10.1 | 61.4       | 0.00076      | 9.34         | 36       | 0.0029        | 7.7         | 30        | 0.007         | 8.3         |
| Калиевые полевые шпаты | 17.8 | 0.0001  | 1.8  | 61.4       | 0.00076      | 9.34         | 31       | 0.0018        | 4.1         | 31        | 0.00034       | 0.4         |
| В граните              | 99.4 | 0.001   | 96.5 | 100        | 0.005        | 97.18        | 100      | 0.0132        | 97.9        | 98        | 0.0253        | 98          |

Примечания. 25 – гранит Карабутацкого массива на Южном Урале (Самаркин, Самаркина, 1981); А – аплитовидный гранит Гиссарского плутона в Таджикистане (Могаровский, 1987); 349a/65 и 825/65, граниты Битю-Джидинского массива в Прибайкалье (Косалс, Мазуров, 1968).  
Здесь и в табл. 2.8-2.10: 1 – содержание минерала, %; 2 – содержание Li в минералах и горных породах, %; 3 – доли масс Li, сконцентрированные в минералах, и их сумма, %.  
Жирным шрифтом выделены данные о литиевых максиминералах.

Таблица 2.8

Минеральный баланс Li в гранодиоритах и сиенитах

| Минералы    | 181  |         |       | Б       |         |         | Эд 167  |         |         | 125      |             |             |
|-------------|------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-------------|-------------|
|             | 1    | 2       | 3     | 1       | 2       | 3       | 1       | 2       | 3       | 1        | 2           | 3           |
| Кварц       | 8.8  | 0.0005  | 2.8   | 22.1    | Не опр. | Не опр. | 0       | —       | —       | 31       | 0.001       | 2.6         |
| Эпидот      | 1    | 0.0037  | 2.3   | Не опр. | Не опр. | Не опр. | Не опр. | Не опр. | Не опр. | 0        | —           | —           |
| Пироксены   | 0    | —       | —     | —       | —       | —       | 7.3     | 0.0131  | 14.75   | 0        | —           | —           |
| Амфиболы    | 30.4 | 0.0033  | 62.7  | 4.2     | 0.004   | 4       | Не опр. | Не опр. | Не опр. | 7        | 0.009       | 5.3         |
| Биотит      | 0    | —       | —     | 4.7     | 0.0426  | 45      | 5.4     | 0.0656  | 54.5    | <b>9</b> | <b>0.09</b> | <b>67.5</b> |
| Нефелин     | 0    | —       | —     | 0       | —       | —       | 23.4    | 0.0043  | 15.55   | 0        | —           | —           |
| Плагиоклазы | 47.8 | 0.0011  | 32.9  | 38.7    | 0.003   | 26      | 62.5    | 0.00058 | 5.55    | 53       | 0.004       | 17.7        |
| КПШ         | 10.2 | 0.00015 | 0.9   | 30.1    | 0.0012  | 8       | 62.5    | 0.00058 | 5.55    | 53       | 0.004       | 17.7        |
| В граните   | 98.2 | 0.0016  | 101.6 | 99.8    | 0.0045  | 83      | 98.6    | 0.0065  | 90.35   | 100      | 0.012       | 93.1        |

Примечание. 181 – гранодиорит Еленовского массива на Южном Урале (Самаркин, Самаркина, 1981); Б – гранодиорит Шахтминского массива в Восточном Забайкалье (Кузмин, Ангелин, 1972); Эд 167 – нефелиновый сиенит из Северо-Восточной Тувы (Коваленко, Пополитов, 1970); 125 – гранодиорит Дурулгуевского массива в Восточном Забайкалье (Залашкова, 1960).

Таблица 2.9

**Минеральный баланс Li в вулканогенных породах**

| Минералы, вещества | 448  |        |    | С-39 |         |    | С-449 |         |    |
|--------------------|------|--------|----|------|---------|----|-------|---------|----|
|                    | 1    | 2      | 3  | 1    | 2       | 3  | 1     | 2       | 3  |
| Кварц              | 11.2 | 0.0017 | 7  | 8    | 0.0014  | 4  | 8     | 0.0012  | 3  |
| Биотит             | 0    | —      | —  | 1    | 0.025   | 10 | 0     | —       | —  |
| Полевые шпаты      | 17.3 | 0.0013 | 9  | 11   | Не обн. | 0  | 14    | Не обн. | 0  |
| Стекло             | 66.5 | 0.0028 | 75 | 80   | 0.0025  | 80 | 74    | 0.004   | 87 |
| В породах          | 95   | 0.0025 | 91 | 100  | 0.0025  | 94 | 96    | 0.0034  | 90 |

Примечание. 448 – витрокластический сваренный туф из позднеюрской-раннемеловой базальт-диабазитовой формации Забайкалья (Лебедева, Шаткова, 1975); С-39 и С-449 – гиллорит и игнимбрит харалгинского комплекса Забайкалья (Геохимия мезозойских..., 1984).

Таблица 2.10

**Минеральный баланс Li в редкометалльных рудах (Солодов и др., 1980)**

| Минералы, вещества | Редкометалльный гранит |        |       | Пегматит |        |       | Пегматит |       |       |
|--------------------|------------------------|--------|-------|----------|--------|-------|----------|-------|-------|
|                    | 1                      | 2      | 3     | 1        | 2      | 3     | 1        | 2     | 3     |
| Кварц              | 25                     | 0.0013 | 0.3   | 30       | 0.0025 | 0.1   | 30       | 0.003 | 0.1   |
| Берилл             | 0                      | —      | —     | 0.4      | 0.3    | 0.2   | 0        | —     | —     |
| Сподумен           | 0                      | —      | —     | 15       | 3      | 81.8  | 22       | 3.5   | 100   |
| Мусковит           | 5                      | 0.08   | 3.6   | 3        | 0.06   | 0.3   | 4        | 0.04  | 0.2   |
| Лепидолит          | 5                      | 2      | 90.1  | 4        | 2.5    | 18.2  | 0        | —     | —     |
| Поллуцит           | 0                      | —      | —     | 1        | 0.06   | 0.1   | 0        | —     | —     |
| Альбит             | 45                     | 0.004  | 1.6   | 25       | 0.01   | 0.5   | 30       | 0.005 | 0.2   |
| Микроклин          | 20                     | 0.028  | 5.1   | 20       | 0.005  | 0.2   | 12       | 0.004 | 0.1   |
| Акцессорные        | Не опр.                | —      | —     | 1.6      | 0.05   | 0.1   | 2        | 0.03  | 0.1   |
| В породах          | 100                    | 0.11   | 100.7 | 100      | 0.55   | 101.5 | 100      | 0.77  | 100.7 |

ва проб, где определено содержание акцессорных минералов. Предполагалось, что если сподумен не упомянут, то в изученной пробе его не было. Данные о содержании литиевых минералов в редкометалльных рудах обычно тоже не сопровождаются данными о валовом содержании Li в исследованных пробах. Иногда приводимые цифры валового содержания Li не соответствуют минеральному составу проб. Исключений (табл. 2.10) мало. Однако иногда возможно приблизительное определение валового содержания Li по данным о минеральном составе исследованных проб с учетом вероятных минеральных балансов этого элемента. По расчету, литиевые слюды появляются в метасоматически измененных гранитоидах при валовом содержании Li не меньше 0.04%. При валовом содержании Li 0.04–0.77% среднее содержание литиевых слюд, %: циннвальдит – 3, лепидолит – 1.6, криофиллит – 0.9. Экстраполяция данных табл. 2.6 показала, что масса участков с содержанием Li > 0.04% составляет около 0.001% массы гранитов и гранито-гнейсов. Вероятное среднее содержание литие-



Таблица 2.11

Доли масс Li, сконцентрированные в максиминералах,  $1.6 \cdot 10^{-5} \%$ 

| Горные породы                              | Сподумен<br>3.36% Li*             | Лепидолит<br>2.23% Li            | Цинн-<br>вальдит<br>1.67% Li     | Протоли-<br>тионит<br>0.83% Li    | Li-биотит<br>0.19% Li | Li-мусковит<br>0.18% Li | Суммарные<br>доли масс |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| Вулканиды кис-<br>лые                      | 0.006<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ )**  | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                           | Не опр.               | Не опр.                 | 0.006                  |
| Вулканиды<br>средние                       | 0.008<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ )    | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                           | Не опр.               | Не опр.                 | 0.008                  |
| Вулканиды в<br>целом                       | 0.003<br>( $2.1 \cdot 10^{-6}$ )  | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                           | Не опр.               | Не опр.                 | 0.003                  |
| Граниты                                    | 0.086<br>( $8.7 \cdot 10^{-5}$ )  | 0.01<br>( $1.6 \cdot 10^{-5}$ )  | 0.015<br>( $3 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.0005<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | 22.91<br>(0.41)       | 4.61<br>(0.087)         | 27.63                  |
| Гранодиориты                               | 0.1<br>( $7 \cdot 10^{-5}$ )      | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                           | 8.3<br>(0.1)          | 1.5<br>(0.019)          | 9.9                    |
| Магматические<br>в целом                   | 0.083<br>( $7.2 \cdot 10^{-5}$ )  | 0.008<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.011<br>( $1.9 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.0003<br>( $1.2 \cdot 10^{-6}$ ) | 18.34<br>(0.28)       | 3.66<br>(0.059)         | 22.1                   |
| Гранито-гнейсы                             | 0.0004<br>( $4 \cdot 10^{-7}$ )   | 0.012<br>( $1.6 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.017<br>( $3 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.0006<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | 22.8<br>(0.36)        | 4.62<br>(0.077)         | 27.45                  |
| Осадочный<br>слой                          | 0.0003<br>( $3.3 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                           | Не опр.               | Не опр.                 | 0.0003                 |
| Гранито-гней-<br>совый слой                | 0.014<br>( $1.3 \cdot 10^{-5}$ )  | 0.005<br>( $7.7 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.002<br>( $4.5 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.0002<br>( $9.4 \cdot 10^{-7}$ ) | 9.5<br>(0.16)         | 1.91<br>(0.034)         | 11.43                  |
| Верхняя часть<br>континенталь-<br>ной коры | 0.01<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.004<br>( $5.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.002<br>( $3.4 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.0002<br>( $7.1 \cdot 10^{-7}$ ) | 6.9<br>(0.12)         | 1.42<br>(0.026)         | 8.34                   |

\* Среднее содержание Li в максиминералах; \*\* в скобках среднее содержание максиминералов, %.

вых слюд в гранитах и гранито-гнейсах (табл. 2.11) определено с учетом приведенных выше данных.

Минимальное для литиевых максиминералов содержание Li 0.09% (Григорьев, 1999). Согласно приведенным в литературе «кларкам» Li для породобразующих минералов (Иванов, 1994, кн. 1), к его максиминералам в масштабах земной коры можно было бы отнести наиболее распространенные слюды. Однако отмеченные «кларки» преувеличены. Закономерности вариаций содержания Li в породобразующих минералах изучены недостаточно. Главный недостаток большинства опубликованных данных – отсутствие сведений о содержании Li в тех пробах горных пород, откуда были выделены изученные минералы. Главное исключение – граниты. Основа приведенных ниже данных – 49 опубликованных минеральных балансов Li в гранитах (Воронцов, Лин, 1966; Дворкин-Самарский и др., 1975; Залашкова, 1960; Злобин, Лебедев, 1960; Коваленко, Пополитов, 1970; Косалс, 1976; Косалс, Мазуров, 1968; Кузьмин, Антипин, 1972; Могаровский, 1987; Петрова, 1972; Самаркин, Самаркина, 1981; Татаринов, Шмакин, 1976; Таусон, 1960). Наиболее распространенные максиминералы здесь биотит и мусковит с содержанием Li  $\geq 0.09\%$ , нами они названы Li-биотитом и Li-мусковитом. Минимальное содержание Li в гранитах, при котором установлен Li-биотит, 0.0045%. В гранитах, содержащих: 0.002–0.005, 0.005–0.008 и 0.008–0.027% Li, средние доли его массы, сконцентрированные в Li-биоти-

те, соответственно равны: 5, 37 и 54%. Среднее содержание Li в Li-биотите соответственно равно 0.13, 0.16 и 0.24%. Минимальное содержание Li в гранитах, при котором установлен Li-мусковит, 0.009%. В гранитах, содержащих 0.008–0.027% Li, средняя доля его массы, сконцентрированная в Li-мусковите, 27% при среднем содержании Li в Li-мусковите 0.18%. Расчет с учетом данных табл. 2.6 показал, что в гранитах в Li-биотите сконцентрировано 22.8% массы Li. Среднее содержание Li в Li-биотите – 0.19%. В Li-мусковите сконцентрировано 4.6% массы Li при среднем содержании в Li-мусковите 0.18% (см. табл. 2.11). Предполагалось, что в менее изученных гранодиоритах ситуация похожа на отмеченную выше. Расчет на этой основе показал, здесь в Li-биотите сконцентрировано в среднем 8.66% массы Li, а в Li-мусковите – 1.51%. Данные, полученные для гранитов, распространены на гранито-гнейсы. Основание – практически одинаковый характер распределения массы Li в гранитах и гранито-гнейсах (см. табл. 2.6). Сиениты и вулканогенные породы изучены только на примере разностей с содержанием  $Li < 0.005\%$ . Литиевые максиминералы здесь не установлены.

Расчет с использованием отмеченных данных показал, что в верхней части континентальной коры в литиевых минералах сконцентрировано всего 0.0162% массы Li. В разностях породообразующих слюд, содержащих  $\geq 0.09\%$  Li, сконцентрировано 8.32% его массы. Максимальной концентрацией массы Li в таких слюдах характеризуются граниты и, вероятно, гранито-гнейсы.

#### 2.2.4. Обсуждение полученных данных

Среднее содержание Li и распределение его массы в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры, определены на основе обширного фактического материала. На этой стадии исследований эту часть данных можно считать корректной. Ее уточнение возможно после разработки более совершенной геохимической модели верхней части континентальной коры и может быть доступно исследователям, имеющим первичные результаты геохимического опробования значительных территорий.

Согласно полученным данным, роль литиевых минералов как носителей Li мала. Специфика Li – низкое его содержание в литиевых минералах. Этим предопределяется малая величина граничного содержания Li в максиминералах. Следствие последнего – относительно большая роль некоторых разностей породообразующих минералов как литиевых максиминералов. Данные, характеризующие их роль как носителей Li, – первое приближение к истине, но они нуждаются в дополнении и уточнении. Главный их недостаток – отсутствие сведений о вариациях содержаний литиевых максиминералов в осадочных породах и продуктах их метаморфизма. В этих породах и в циркулирующих в них подземных водах, вероятно, находится основная и наиболее доступная часть потенциально извлекаемого Li, но получение данных о ней возможно только при специальных трудоемких исследованиях. Уже только поэтому полученные цифры следует рассматривать как минимально возможные.

## 2.2.5. Выводы

Среднее содержание Li в верхней части континентальной коры 0.0033%. Наибольшее среднее содержание установлено в глинистых породах и продуктах их метаморфизма, соответственно, 0.0054 и 0.0038%. В них сконцентрировано 52.21% всей массы Li. Для каждой горной породы определено распределение масс Li по участкам с содержаниями низким ( $< 0.002\%$ ), средним (0.002–0.005%), повышенным (0.005–0.008%) и высоким ( $> 0.008\%$ ). Распределение масс Li в разных горных породах по таким участкам, соответственно, %: 0.54–49.79; 33.86–93.17; 33.09–54.35 и 0.39–17.49%. К максиминералам отнесены литиевые минералы и те разновидности нелитиевых, где содержание Li  $\geq 0.09\%$ . Установлено, что в верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 8.34% всей массы Li. В том числе, мас. %: Li-биотите – 6.9, Li-мусковите – 1.42, сподумене – 0.01, лепидолите – 0.004, циннвальдите – 0.002, протолитионите – 0.0002. Эти цифры минимально возможные.

## 2.3. РУБИДИЙ

### 2.3.1. Среднее содержание и распределение масс Rb в верхней части континентальной коры

Новый расчет среднего содержания Rb в горных породах выполнен по опубликованным результатам более 8000 количественных анализов. При расчете исключены результаты целенаправленного изучения участков горных пород с повышенным содержанием Rb, а также данные из таких публикаций, где осадочные и магматические породы не разделены с продуктами их метаморфизма. Главные источники данных: осадочные породы (Маслов и др., 2004; Солодов и др., 1980; Gallet et al., 1998; Götze, 1998; Di Leo P. et al., 2002; Huber et al., 2001); вулканы осадочного слоя (Карапетян, Меликсетян, 1981; Лебедева, 1981; Леонова, Кирсанов, 1974; Леонова, Удальцова, 1971; Нестеренко, Фролова, 1965; Пополитов, Волинец, 1981; Солодов и др., 1980; Goodman, 1972; Toothill et al., 2007); магматические породы гранитно-гнейсового слоя (Воронцов, Лиин, 1966; Грабежев, 1981; Коваленко, Пополитов, 1970; Корнев и др., 1974; Кузнецов и др., 2006; Куц, Мищенко, 1963; Ляхович, Гурбанов, 1992; Миловский и др., 1985; Могаровский, 1987; Одикадзе, 1968; Павленко и др., 1974; Самаркина, Самаркин, 1981); метаморфические породы (Буданова, 1991; Коллерсон и др., 1980; Кременецкий, Овчинников, 1986; Макрыгина и др., 1994; Макрыгина, Петрова, 1996; Петров, Макрыгина, 1975; Петрова, Макрыгина, 1994; Петрова, Левицкий, 1984; Ставров, 1978; Condie et al., 1991; Yang et al., 1998).

Новые значения среднего содержания Rb в горных породах (табл. 2.5) близки к опубликованным (Григорьев, 2003). Среднее содержание Rb в верхней части континентальной коры, по новым данным, 0.0098%, это значение близко к обычно приводимым другими авторами – 0.0082–0.0112 (Rudnik, Gao, 2004; Wedepohl, 1995). Среднее содержание Rb максимальное в гранитах и сиенитах, средние коэффициенты концентрации, соответст-

венно, 2.11 и 1.8, но в гранитах и сиенитах сконцентрировано всего 17.26% массы Rb. Больше половины его массы (53.54%) находится в осадочных и параметаморфических породах. Среднее содержание Rb в осадочных породах континентальной коры 0.0092% больше соответствующего продуктам выветривания гранитно-гнейсового слоя современного состава – 0.0083 (расчет изоалюминиевым методом).

### 2.3.2. Вариации концентрации масс Rb в горных породах

Основа расчета – частота встречаемости проб с разным содержанием Rb. Главные источники данных перечислены выше. Использованы результаты количественных анализов отдельных проб горных пород и средние из 2–10 определений. Обобщения результатов более чем 10 анализов учитывались, как правило, только при наличии данных, позволяющих приблизительно определить количество проб с разным содержанием Rb. Установлено, что больше половины массы гранитов представлено разностями с повышенным, высоким и очень высоким содержаниями Rb. В них сконцентрировано 83.1% имеющейся в гранитах массы этого элемента (табл. 2.12). Глины и глинистые сланцы,

Таблица 2.12

**Соотношение масс горных пород с разным содержанием  
и распределение масс Rb в них, %**

| Горные породы            | Количество проб | Доли масс горных пород с содержанием Rb |                       |                         |                      |                         |
|--------------------------|-----------------|-----------------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
|                          |                 | низким<br>< 0.005                       | средним<br>0.005–0.01 | повышенным<br>0.01–0.03 | высоким<br>0.03–0.05 | очень высоким<br>> 0.05 |
| Граниты                  | 1036            | 4.83                                    | 32.04                 | 45.56                   | 14.58                | 2.99                    |
| Глины и глинистые сланцы | 951             | 8.2                                     | 53.93                 | 36.9                    | 0.42                 | 0.55                    |
| Кислые вулканыты         | 853             | 22.85                                   | 39.04                 | 31.32                   | 5.74                 | 1.05                    |
| Парагнейсы и парасланцы  | 1279            | 26.66                                   | 53.08                 | 18.07                   | 0.24                 | 1.95                    |
| Пески и песчаники        | 1258            | 26.59                                   | 71.10                 | 2.31                    | Не обн.              | Не обн.                 |
| Средние вулканыты        | 915             | 65.02                                   | 22.85                 | 11.69                   | 0.33                 | 0.11                    |
| Основные вулканыты       | 913             | 92.76                                   | 6.03                  | 1.1                     | 0.11                 | Не обн.                 |
| Метабазиты               | 860             | 95.33                                   | 4.2                   | 0.47                    | Не обн.              | Не обн.                 |

| Горные породы            | Доли масс Rb в горных породах с его содержанием |                       |                         |                      |                         |
|--------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
|                          | низким<br>< 0.005                               | средним<br>0.005–0.01 | повышенным<br>0.01–0.03 | высоким<br>0.03–0.05 | очень высоким<br>> 0.05 |
| Граниты                  | 0.7                                             | 16.2                  | 46.92                   | 27.23                | 8.95                    |
| Глины и глинистые сланцы | 2.2                                             | 46.5                  | 47.15                   | 1.02                 | 3.13                    |
| Кислые вулканыты         | 4.22                                            | 28.7                  | 46.37                   | 14.77                | 5.94                    |
| Парагнейсы и парасланцы  | 5.46                                            | 49.39                 | 32.14                   | 1.11                 | 11.9                    |
| Пески и песчаники        | 14.56                                           | 79.37                 | 6.07                    | Не обн.              | Не обн.                 |
| Средние вулканыты        | 23.51                                           | 42.55                 | 31.18                   | 1.74                 | 1.02                    |
| Основные вулканыты       | 75.83                                           | 14.46                 | 8.45                    | 1.26                 | Не обн.                 |
| Метабазиты               | 76.24                                           | 18.66                 | 5.1                     | Не обн.              | Не обн.                 |

пески и песчаники, парагнейсы и парасланцы, а также кислые вулканыты представлены преимущественно разностями со средним и повышенным содержанием Rb. В этих разностях находится больше половины тех масс Rb, которые имеются в этих горных породах. Остальные изученные горные породы представлены преимущественно разностями с низким содержанием Rb.

### 2.3.3. О минеральном балансе Rb и вероятной роли максиминералов как его носителей

Вариации минеральных балансов Rb определены только на примере некоторых магматических пород и редкометалльных руд. В гранитах и гранодиоритах главные концентраторы и носители Rb биотит и калиевые полевые шпаты (табл. 2.13, 2.14). Концентраторы Rb мусковит, хлориты, амфиболы, но роль их как носителей Rb значительна только в отдельных случаях. В кислых и средних вулканогенных породах Rb находится преимущественно в стекле и продуктах его раскристаллизации (табл. 2.15). В гранитных пегматитах, кроме отмеченных выше минералов, важнейшими носителями Rb иногда являются лепидолит (табл. 2.16) и протолизионит. В существенно флогопитовых метасоматитах главный концентратор и носитель Rb флогопит (табл. 2.17).

Содержанием Rb больше минимального для максиминералов 0.2% (Григорьев, 1990) обычно характеризуются литиевые минералы протолизионит (Rb от 0.46 до 3.07, среднее 0.91%) и лепидолит (Rb от 0.15 до 4.5, среднее 1.3%). Они рассматриваются как рубидиевые максиминералы в масштабах верхней части континентальной коры. Их содержание в горных породах (табл. 2.18) определено при изучении распределения здесь Li (см. предшествующий раздел). Содержание Rb 0,2 % и больше встречается во многих породообразующих минералах, особенно в калиевых. Здесь такие разности рассматриваются как рубидиевые. Rb-микроклин – главный носитель Rb в некоторых редкометалльных пегматитах (см. табл. 2.16), но он не известен

Таблица 2.13

Минеральный баланс Rb в гранитах

| Минералы   | 45а  |         |      | 849а/65 |         |           | А    |       |             |
|------------|------|---------|------|---------|---------|-----------|------|-------|-------------|
|            | 1    | 2       | 3    | 1       | 2       | 3         | 1    | 2     | 3           |
| Кварц      | 32.5 | 0.00037 | 0.5  | 30      | 0.0008  | 1.8       | 37.4 | 0.011 | 6.8         |
| Мусковит   | 0    | Не опр. | 0    | 0       | Не опр. | 0         | 1.4  | 0.5   | <b>11.7</b> |
| Биотит     | 3.3  | 0.14    | 20.8 | 3       | 0.415   | <b>29</b> | 3.2  | 0.33  | <b>17.7</b> |
| Плагиоклаз | 39.1 | 0.001   | 1.8  | 36      | 0.0019  | 2         | 27.8 | 0.028 | 13          |
| Микроклин  | 24.6 | 0.0612  | 68.1 | 31      | 0.082   | 65.7      | 29.9 | 0.09  | 44.8        |
| В граните  | 99.5 | 0.0221  | 94.3 | 100     | 0.0431  | 98.5      | 99.7 | 0.06  | 94          |

Примечание. 45а – Карабутацкий массив на Южном Урале (Самаркина, Самаркин, 1981); 849а/65 – Битуджинский массив (Косалс, Мазуров, 1968); А – Каменные Могилы (Куц, Мищенко, 1963). Здесь и в табл. 2.14–2.17: 1 – содержание минералов, %, 2 – содержание Rb, %, 3 – доли масс Rb, %; полужирным шрифтом выделены доли масс Rb, сконцентрированные в максиминералах.

Таблица 2.14

**Минеральный баланс Rb в гранитоидах повышенной основности и щелочности**

| Минералы    | КМ-28 |         |         | Б    |         |       | В    |         |         |
|-------------|-------|---------|---------|------|---------|-------|------|---------|---------|
|             | 1     | 2       | 3       | 1    | 2       | 3     | 1    | 2       | 3       |
| Кварц       | 17.22 | Не опр. | Не опр. | 6.1  | Сл.     | < 0.1 | 13.3 | 0.001   | 1.7     |
| Амфиболы    | 9.33  | 0.0016  | 1       | 3.8  | 0.0041  | 1     | 7    | 0.0005  | 0.4     |
| Пироксены   | 0     | Не опр. | 0       | 3.2  | 0.0029  | 1     | 0.2  | Не опр. | Не опр. |
| Бiotит      | 19.52 | 0.04    | 63      | 0    | Не опр. | 0     | 0    | Не опр. | 0       |
| Плаггиоклаз | 47.8  | 0.0072  | 28      | 53.6 | 0.0016  | 7     | 51.4 | 0.001   | 6.4     |
| КПШ         | 5.65  | 0.026   | 12      | 30.2 | 0.0355  | 89    | 25.5 | 0.026   | 82.9    |
| В породе    | 99.52 | 0.0124  | 104     | 96.9 | 0.012   | 98    | 97.4 | 0.008   | 91.4    |

Примечание. КМ-28 – гранодиорит из Газимурского района (Козлов, 1972); Б и В – сиенито-диорит и гранодиорит из Сапкопольского массива (Воронцов, Лин, 1966). КПШ – калиевые полевые шпаты.

Таблица 2.15

**Минеральный баланс Rb в вулканогенных породах**

| Минералы                | 31-8 |         |      | С-39    |         |         |
|-------------------------|------|---------|------|---------|---------|---------|
|                         | 1    | 2       | 3    | 1       | 2       | 3       |
| Кварц                   | 0    | Не опр. | 0    | 8.4     | 0.0008  | 0.1     |
| Бiotит                  | 3.3  | 0.018   | 2    | 1.3     | 0.085   | 2       |
| Плаггиоклаз             | 16.6 | 0.0018  | 0.9  | 10.5    | 0.019   | 4.2     |
| Акцессории              | 2.5  | 0.0029  | 0.3  | Не опр. | Не опр. | Не опр. |
| Стекло и основная масса | 76   | 0.036   | 93.8 | 79.8    | 0.053   | 88.1    |
| В породе                | 98   | 0.029   | 97   | 100     | 0.048   | 94.7    |

Примечание. 31-8 – витрокластический туф дацитового состава из Забайкалья (Лебедева, Шаткова, 1975); С-39 гиллориолит из Забайкалья (Геохимия мезозойских..., 1984).

Таблица 2.16

**Варианты среднего минерального баланса Rb в редкометалльных пегматитах**

| Минералы     | Г   |         |             | Д    |         |            | Е   |       |             |
|--------------|-----|---------|-------------|------|---------|------------|-----|-------|-------------|
|              | 1   | 2       | 3           | 1    | 2       | 3          | 1   | 2     | 3           |
| Кварц        | 30  | 0.002   | 0.6         | 28   | Не обн. | 0          | 30  | 0.005 | 0.3         |
| Берилл       | 0   | Не опр. | Не опр.     | 0.3  | 0.04    | 0.1        | 0.4 | 0.15  | 0.1         |
| Сподумен     | 22  | 0.01    | 2.3         | 5.7  | Не обн. | 0          | 15  | 0.015 | 0.5         |
| Мусковит     | 4   | 0.8     | <b>33</b>   | 6    | 0.392   | <b>17</b>  | 3   | 1.8   | <b>11.5</b> |
| Лепидолит    | 0   | Не опр. | Не опр.     | 0.12 | 1.7     | <b>1.5</b> | 4   | 1.5   | <b>12.8</b> |
| Поллуцит     | 0   | —”—     | —”—         | 0    | Не опр. | Не опр.    | 1   | 1     | <b>2.1</b>  |
| Альбит       | 30  | 0.008   | 2.1         | 18   | 0.002   | 0.3        | 25  | 0.01  | <b>0.5</b>  |
| Микроклин    | 12  | 0.5     | <b>61.9</b> | 41.5 | 0.269   | <b>81</b>  | 20  | 1.5   | <b>63.8</b> |
| Прочие       | 2   | 0.01    | 0.2         | 0.38 | 0.036   | 0.1        | 1.6 | 0.02  | 0.1         |
| В пегматитах | 100 | 0.097   | 100.1       | 100  | 0.138   | 100        | 100 | 0.47  | 91.7        |

Примечание. Г и Е (Солодов и др., 1980); Д (Коган и др., 1971).

Таблица 2.17

**Минеральный баланс Rb и Cs в олигоклаз-флогопитовых жилах (Солодов и др., 1980)**

| Минералы  | Rb  |       |       | Cs     |       |
|-----------|-----|-------|-------|--------|-------|
|           | 1   | 2     | 3     | 2      | 3     |
| Кварц     | 2   | 0.003 | < 0.1 | 0.001  | 0.1   |
| Берилл    | 1.2 | 0.01  | < 0.1 | 0.03   | 1.2   |
| Актинолит | 2   | 0.005 | < 0.1 | 0.0005 | < 0.1 |
| Тальк     | 2   | 0.006 | < 0.1 | 0.0075 | 0.5   |
| Мусковит  | 10  | 0.3   | 12.5  | 0.01   | 3.3   |
| Флогопит  | 68  | 0.3   | 85    | 0.04   | 90.7  |
| Маргарит  | 3   | 0.006 | < 0.1 | 0.04   | 90.7  |
| Хлорит    | 3   | 0.005 | < 0.1 | 0.0006 | 0.1   |
| Поллуцит  |     |       |       | 0.0007 | 0.1   |
| Олигоклаз | 6   | 0.002 | 0.1   | 0.001  | 0.2   |
| Прочие    | 2.8 | 0.01  | 0.1   | 0.001  | 0.1   |
| В жилах   | 100 | 0.24  | 97.7  | 0.03   | 96.3  |

Таблица 2.18

**Доли масс Rb, сконцентрированные в максиминералах**

| Горные породы                      | Лепидолит<br>1.3% Rb*           | Протолитионит<br>0.91% Rb      | Rb-биотит<br>0.2% Rb | Rb-мусковит<br>0.2% Rb | Суммарные<br>доли масс |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Граниты                            | 0.001 (1.6·10 <sup>-5</sup> )** | 0.0001 (2·10 <sup>-6</sup> )   | 1.37 (0.14)          | 0.52 (0.053)           | 1.8911                 |
| Гранито-гнейсы                     | 0.002 (1.6·10 <sup>-5</sup> )   | 0.0002 (2·10 <sup>-6</sup> )   | Не опр.              | Не опр.                | 0.002                  |
| Гранитно-гнейсовый слой            | 0.001 (7.7·10 <sup>-6</sup> )   | 0.0001 (9.4·10 <sup>-7</sup> ) | 0.3 (0.015)          | 0.11 (0.0057)          | 0.4111                 |
| Верхняя часть континентальной коры | 0.0008 (5.8·10 <sup>-6</sup> )  | 0.0001 (7.1·10 <sup>-7</sup> ) | 0.23 (0.011)         | 0.091 (0.0044)         | 0.3219                 |

\* Среднее содержание Rb в максиминералах; \*\* среднее содержание максиминералов, %.

в широко распространенных горных породах. Наибольший интерес представляют Rb-биотит и Rb-мусковит, но данных об их содержании в абсолютном большинстве горных пород нет. В этом отношении изучены только граниты. Судя по имеющимся данным, закономерности вариаций содержания Rb в слюдах здесь очень сложные. Содержание Rb в них повышается с увеличением его валового содержания в гранитах и уменьшается с увеличением содержания каждого из калиевых минералов, а также амфиболов и хлоритов. Влияют и другие факторы, в частности генезис гранитоидов. Поэтому возможна только весьма приблизительная оценка вероятного среднего содержания в гранитах Rb-биотита и Rb-мусковита.

**Rb-биотит.** Минимальное содержание Rb в гранитах, содержащих Rb-биотит, 0.027%, но существенную роль эта разность биотита играет только в гранитах с содержанием Rb 0.04–0.05%. Здесь содержание Rb в биотите варьирует от 0.1 до 0.42% (среднее 0.2%). Граниты с содержанием Rb > 0.05% почти не изучены. По имеющимся данным, здесь обычных разностей биотита нет, есть только Rb-биотит. При расчете предполагалось, что среднее со-

держание Rb в нем 0.2%. Предполагалось также, что среднее содержание Rb-биотита здесь соответствует среднему содержанию биотита в гранитах по последнему расчету автора – 4.8%.

**Rb-мусковит.** В мусковите коэффициенты концентрации Rb 0.3–15.06, средний коэффициент концентрации – 6.8, поэтому предполагалось, что в гранитах с содержанием Rb > 0.03% обычных разностей мусковита нет, есть только Rb-мусковит. Среднее содержание Rb в нем принято 0.2%. Таким образом, минимально возможная роль Rb-биотита и Rb-мусковита как носителей Rb определена только для гранитов. При расчете предполагается, что в верхней части континентальной коры отмеченные разности слюд имеются только в гранитах. В максиминералах сконцентрировано около 0.32% массы Rb (табл. 2.18).

#### 2.3.4. Обсуждение полученных данных

Среднее содержание Rb и распределение его массы в ассоциации горных пород континентальной коры определены на основе обширного фактического материала, но для Rb характерны большие вариации содержания в горных породах, поэтому желательно уточнение установленных величин по мере накопления новых анализов горных пород, особенно осадочных, параметаморфических и вулканогенных.

Данные, характеризующие роль рубидиевых максиминералов, вероятно, преуменьшены. Главный их недостаток – почти полное отсутствие прямых определений содержания максиминералов в распространенных горных породах. Единственное исключение – граниты. Но и здесь определенная расчетом роль максиминералов, вероятно, преуменьшена. В частности, не учтен факт наличия Rb-биотита в некоторых гранитах с содержанием Rb < 0.5%. При дальнейших исследованиях особенного внимания заслуживают осадочные и параметаморфические породы. В них и в циркулирующих здесь подземных водах, возможно, находится основная и наиболее доступная часть потенциально извлекаемого Rb.

#### 2.3.5. Выводы

Среднее содержание Rb в верхней части континентальной коры 0.0098%. Наибольшее среднее содержание Rb 0.0205% установлено в гранитах, но в них сконцентрировано только 17.17% его массы. Больше половины массы Rb (53.54 %) находится в осадочных и параметаморфических породах. В каждой горной породе определено распределение масс Rb по участкам с содержаниями: низким (< 0.005%), средним (0.005–0.01%), повышенным (0.01–0.03%), высоким (0.03–0.05%) и очень высоким (> 0.05%). Распределение масс Rb в разных горных породах по таким участкам, соответственно, %: 0.7–76.24; 14.46–79.37; 5.1–47.15; 0–27.23 и 0–11.9.

Установлено, что в верхней части континентальной коры в рубидиевых максиминералах сконцентрировано 0.3219% всей массы Rb, в том числе в Rb-биотите – 0.23, Rb-мусковите – 0.091, лепидолите – 0.0008, протолитиионите – 0.0001. Эти цифры – лишь первое приближение к истине.



## 2.4. ЦЕЗИЙ

### 2.4.1. Среднее содержание и распределение масс Cs в верхней части континентальной коры

Новый расчет среднего содержания Cs в горных породах выполнен по опубликованным результатам около 7000 количественных анализов. При расчете исключены результаты целенаправленного изучения участков горных пород с повышенным содержанием Cs, а также данные из таких публикаций, где осадочные и магматические породы не разделены с продуктами их метаморфизма. Главные источники данных: осадочные породы (Маслов и др., 2006, 2007; Мизенс и др., 2006; Солодов и др., 1980; Gallet et al., 1998; Götze, 1998; Huber et al., 2001); вулканиты осадочного слоя (Карапетян, Меликсетян, 1981; Кременецкий и др., 1973; Леонова, Кирсанов, 1974; Леонова, Удальцова, 1971; Леонова и др., 1971; Солодов и др., 1980; Чашин и др., 2007; Kay et al., 2007; Kobayashi et al., 2007; Krienitz et al., 2007; Marshesi et al., 2007; Toothill et al., 2007); магматические породы гранитно-гнейсового слоя (Антипин, 1977; Грабежев, 1981; Корнев и др., 1974; Костицын и др., 2007; Кузнецов и др., 2006; Ляхович, Гурбанов, 1992; Одикадзе, 1968); метаморфические породы (Буданова, 1991; Петрова и др., 2000; Ставров, 1978; Condie et al., 1991; Yang et al., 1998). Некоторые новые значения среднего содержания Cs в горных породах (табл. 2.5) больше опубликованных раньше (Григорьев, 2003). Среднее содержание Cs в верхней части континентальной коры, по новым данным,  $5.5 \cdot 10^{-4} \%$ . Эта цифра близка к обычно приводимым другими авторами –  $3.55 \cdot 10^{-4}$ – $7.3 \cdot 10^{-4} \%$  (Rudnik, Gao, 2004; Wedepohl, 1995). Среднее содержание Cs максимально в кислых вулканитах и глинистых породах, средние коэффициенты концентрации, соответственно, 2.73 и 2.36. Затем следуют песчаные породы, граниты и сиениты. Средние коэффициенты концентрации, соответственно, 1.53, 1.33 и 1.27. Больше половины массы Cs (57.79%) находится в осадочных породах и продуктах их метаморфизма. Цезий избыточный элемент. Его среднее содержание в осадочных породах континентальной коры  $9.5 \cdot 10^{-4} \%$  вдвое больше соответствующего продуктам выветривания гранитно-гнейсового слоя современного состава –  $4.5 \cdot 10^{-4} \%$  (расчет изоалюминиевым методом).

### 2.4.2. Вариации концентрации масс Cs в горных породах

Основа расчета – частота встречаемости проб с разным содержанием Cs. Главные источники данных перечислены выше. Использованы результаты количественных анализов отдельных проб горных пород и средние из 2–10 определений. Обобщения результатов более чем 10 анализов учитывались, как правило, только при наличии данных, позволяющих приблизительно определить количество проб с разным содержанием Cs. Цезий характеризуется крайне неравномерным распределением. Больше половины масс большинства горных пород характеризуется низким его со-

Таблица 2.19

**Соотношение масс горных пород с разным содержанием Cs ( $n \cdot 10^{-4} \%$ )  
и распределение в них масс Cs**

| Горные породы      | Количество проб | Доли масс горных пород с содержанием Cs |              |                  |                |                     |
|--------------------|-----------------|-----------------------------------------|--------------|------------------|----------------|---------------------|
|                    |                 | Низкое < 5                              | Среднее 5–10 | Повышенное 10–50 | Высокое 50–100 | Очень высокое > 100 |
| Пески, песчаники   | 867             | 15.11                                   | 59.22        | 25.66            | Не обн.        | Не обн.             |
| Глины, сланцы      | 775             | 9.42                                    | 16.91        | 73.41            | 0.26           | Не обн.             |
| Кислые вулканыты   | 611             | 35.52                                   | 23.9         | 36.74            | 2.37           | 1.47                |
| Средние вулканыты  | 520             | 65.39                                   | 20.86        | 12.6             | 0.38           | 0.77                |
| Основные вулканыты | 718             | 91.22                                   | 4.1          | 3.62             | 1.06           | Не обн.             |
| Граниты            | 904             | 50.22                                   | 29.92        | 18.53            | 1.33           | Не обн.             |
| Парасланцы         | 1046            | 78.57                                   | 18.41        | 2.73             | Не обн.        | 0.29                |
| Метабазиты         | 642             | 94.54                                   | 3.35         | 1.8              | 0.31           | Не обн.             |

| Горные породы      | Доли масс Cs в участках горных пород с содержанием |              |                  |                |                     |
|--------------------|----------------------------------------------------|--------------|------------------|----------------|---------------------|
|                    | Низкое < 5                                         | Среднее 5–10 | Повышенное 10–50 | Высокое 50–100 | Очень высокое > 100 |
| Пески, песчаники   | 4.21                                               | 56.41        | 39.38            | Не обн.        | Не обн.             |
| Глины, сланцы      | 2.28                                               | 10.89        | 85.6             | 1.23           | Не обн.             |
| Кислые вулканыты   | 4.99                                               | 11.75        | 51.55            | 10.66          | 21.05               |
| Средние вулканыты  | 16.84                                              | 22.9         | 29.75            | 4.25           | 26.26               |
| Основные вулканыты | 43.04                                              | 10.59        | 20.91            | 25.46          | Не обн.             |
| Граниты            | 15.41                                              | 29.24        | 42.51            | 12.84          | Не обн.             |
| Парасланцы         | 45.15                                              | 32.17        | 11.42            | Не обн.        | 11.27               |
| Метабазиты         | 75.15                                              | 6.32         | 11.67            | 6.14           | Не обн.             |

держанием (табл. 2.19). Исключения – глинистые породы (глины, глинистые сланцы, аргиллиты, мергели с содержанием карбонатов < 50%), песчаные породы (пески, песчаники, алевролиты) и кислые вулканыты. Больше половины их масс характеризуется средним и повышенным содержанием Cs. В большинстве горных пород массы Cs находятся преимущественно в участках со средним и повышенным его содержанием. Наибольший интерес представляют кислые и средние вулканыты, а также парасланцы, где значительные доли масс Cs сконцентрированы в участках с очень высоким его содержанием (>0.01%).

#### 2.4.3. О минеральном балансе Cs и вероятной роли максиминералов как его носителей

Вариации минеральных балансов Cs определены только на примере некоторых магматических пород и редкометалльных руд. В гранитах и гранодиоритах главные концентраторы и носители Cs биотит и калиевые полевые шпаты (табл. 2.20, 2.21), но концентрация Cs в последних незначительная. Концентраторы Cs мусковит, хлориты, амфиболы, но роль их как носителей Cs значительна только в отдельных случаях. Важнейшие носители

Таблица 2.20

**Минеральный баланс Cs в гранитах**

| Минералы    | 25      |         |      | 376/65 |         |      | Без номера |     |         |
|-------------|---------|---------|------|--------|---------|------|------------|-----|---------|
|             | 1       | 2       | 3    | 1      | 2       | 3    | 1          | 2   | 3       |
| Кварц       | 26.3    | Не обн. | 0    | 25     | Не обн. | 0    | 88.9       | < 2 | < 10    |
| Плагиоклазы | 50.6    | 1.7     | 43   | 30     | 5       | 8.8  | 88.9       | < 2 | < 10    |
| КПШ         | 17.8    | 2.3     | 20.5 | 31     | 9       | 16.2 | 88.9       | < 2 | < 10    |
| Мусковит    | Не обн. | Не опр. | 0    | 2      | 100     | 11.8 | 8          | 190 | 84.4    |
| Бiotит      | 4.7     | 14.6    | 34.3 | 10     | 105     | 61.8 | 2.8        | 45  | 7       |
| В породах   | 99.4    | 2       | 97.8 | 98     | 17      | 98.6 | 99.7       | 18  | < 101.4 |

Примечание. 25 – Карабутацкий массив на Южном Урале (Самаркин, Самаркина, 1981); 376/65 – массив апогранитов (Косал, 1976); без номера – каракульский комплекс в Таджикистане, по В.С. Луткову (Могаровский, 1987). Здесь и в табл. 2.21–2.23: 1 – содержание минерала, %; 2 – содержание Cs в минералах и горных породах,  $n \cdot 10^{-4}$  %, 3 – доли массы Cs, сконцентрированные в минералах и их сумма, %; КПШ – калиевые полевые шпаты.

Таблица 2.21

**Минеральный баланс Cs в гранитоидах повышенной основности**

| Минералы        | 18290   |         |       | 31-8 |         |       | С-39    |         |      |
|-----------------|---------|---------|-------|------|---------|-------|---------|---------|------|
|                 | 1       | 2       | 3     | 1    | 2       | 3     | 1       | 2       | 3    |
| Кварц           | 15.5    | Сл.     | < 1.5 | 21.6 | Не обн. | 0     | 19.7    | < 2     | 2    |
| Роговая обманка | 13.8    | 2.5     | 14.7  | 9.5  | 0.5     | 1.9   | Не обн. | Не опр. | 0    |
| Бiotит          | Не обн. | Не опр. | 0     | 9.4  | 10.4    | 39.1  | 10      | 82      | 68.3 |
| Плагиоклазы     | 43.5    | 2       | 37.2  | 45.6 | 2.8     | 51.1  | 70.3    | 3       | 17.6 |
| КПШ             | 24.8    | 4.5     | 47.7  | 12.2 | 2.8     | 13.7  | 70.3    | 3       | 17.6 |
| В породах       | 97.6    | 2.34    | 101.1 | 98.3 | 2.5     | 105.8 | 100     | 12      | 87.9 |

Примечание. 206 – сиенито-диорит Еленовского массива на Южном Урале (Самаркин, Самаркина, 1981); 129 – гранодиорит Среднеушкатинского массива на Южном Урале (Самаркин, Самаркина, 1981); без номера – адамеллит каракульского комплекса в Таджикистане, по В.С. Луткову (Могаровский, 1987).

Таблица 2.22

**Минеральный баланс Cs в вулканогенных породах**

| Минералы      | 458  |         |    | С-449   |         |     | 448  |      |     |
|---------------|------|---------|----|---------|---------|-----|------|------|-----|
|               | 1    | 2       | 3  | 1       | 2       | 3   | 1    | 2    | 3   |
| Кварц         | 12.5 | 5       | 2  | 8       | 5       | < 1 | 11.2 | 24   | < 1 |
| Полевые шпаты | 11.2 | 12      | 4  | 18      | 12      | 1   | 17.3 | 170  | 1   |
| Акцессории    | 1.3  | Не обн. | 0  | Не обн. | Не опр. | 0   | 0.5  | 110  | < 1 |
| Стекло        | 69.4 | 47      | 86 | 74      | 220     | 81  | 66.5 | 3300 | 95  |
| В породах     | 94.4 | 38      | 92 | 100     | 200     | 82  | 95.5 | 2300 | 96  |

Примечание. 448 и 458 – витрокластические сваренные туф липаритового состава из позднюрской-раннемеловой базальт-липаритовой формации Забайкалья (Лебедева, Шаткова, 1975); С-449 – игнимбрит харалгинского комплекса Забайкалья (Геохимия мезозойских..., 1984).

Таблица 2.23

**Минеральный баланс Cs в пегматитовых жилах: А и В (Солодов и др., 1980),  
Б (Коган и др., 1971)**

| Минералы     | А       |       |       | Б       |         |      | В   |       |       |
|--------------|---------|-------|-------|---------|---------|------|-----|-------|-------|
|              | 1       | 2     | 3     | 1       | 2       | 3    | 1   | 2     | 3     |
| Кварц        | 30      | 0.001 | 3.7   | 28      | 0.000   | 0    | 30  | 0.002 | 0.2   |
| Cs-берилл    | 0       | –     | –     | 0.3     | 1.035   | 17.2 | 0.4 | 2     | 2.3   |
| Сподумен     | 22      | 0.005 | 13.7  | 5.7     | 0.007   | 2.2  | 15  | 0.03  | 0.4   |
| Мусковит     | 4       | 0.05  | 25    | 6       | 0.048   | 16   | 3*  | 1.5   | 12.9  |
| Cs-лепидолит | Не обн. | –     | –     | 0.12    | 0.239   | 1.6  | 4   | 0.5   | 5.7   |
| Поллуцит     | Не обн. | –     | –     | Не обн. | –       | –    | 1   | 30    | 85.7  |
| Альбит       | 30      | 0.004 | 15    | 18      | 0.003   | 3    | 25  | 0.005 | 0.4   |
| Микроклин    | 12      | 0.03  | 45    | 41.5    | 0.026   | 59.9 | 20  | 0.1   | 5.7   |
| Прочие       | 2       | 0.005 | 1.3   | 0.38    | 0.0007  | 0.1  | 1.6 | 0.01  | < 0.1 |
| В породах    | 100     | 0.008 | 103.7 | 100     | 0.018** | 100  | 100 | 0.35  | 113.3 |

\* Cs-мусковит, \*\* содержание Cs определено пересчетом по остальным приведенным здесь данным.

Cs – плагиоклазы, обычно не являются его концентраторами. В кислых и средних вулканогенных породах Cs находится преимущественно в стекле и продуктах его раскристаллизации (табл. 2.22). В гранитных пегматитах, кроме отмеченных выше минералов, важными носителями Cs иногда являются литиевые минералы, берилл и поллуцит (табл. 2.23). В существенно флогопитовых метасоматитах главный концентратор и носитель Cs флогопит (см. табл. 2.17).

Практически ценный цезиевый минерал поллуцит встречен только в гранитных пегматитах с содержанием Cs 0.35–1.9% (Солодов и др., 1980; Овчинников и др., 1972), здесь он главный носитель Cs (см. табл. 2.23). Вопрос о возможности наличия участков с таким высоким содержанием Cs в распространенных горных породах пока остается открытым.

Очень большие вариации содержания Cs характерны для берилла, калиевых и некоторых других минералов. Средним содержанием Cs больше минимального для максиминералов (0.11%) (Григорьев, 1990) характеризуются: берилл (от 0.0005 до 6.28, среднее – 0.33%), протолитинит (от < 0.01 до 3.83, среднее 0.54%) и лепидолит (от < 0.01 до 1.13, среднее 0.39%). Они рассматриваются как цезиевые максиминералы в масштабах верхней части континентальной коры. Их содержание в горных породах (табл. 2.24) определено при изучении распределения в горных породах Be и Li (см. соответствующие разделы). Содержание Cs 0.11% и более иногда встречается во многих листовых силикатах. Наибольший интерес представляют такие разности биотита и мусковита. Здесь они названы Cs-биотитом и Cs-мусковитом. Вариации содержания Cs в слюдах изучены недостаточно. Главный недостаток большинства опубликованных данных – отсутствие сведений о содержании Cs в тех пробах горных пород, откуда были выделены слюды. Главное исключение – гранитоиды (Косалс, 1976; Могаровский, 1987; Самаркин, Самаркина, 1981). В грани-

Таблица 2.24

**Доли масс Cs (%), вероятно сконцентрированные в максиминералах  
(в скобках – содержание максиминералов)**

| Горные породы                            | Протолитионит<br>0.54% Cs        | Лепидолит<br>0.39% Cs            | Берилл<br>0.33% Cs               | Cs-биотит<br>0.11% Cs          | Cs-стекло<br>0.11% Cs            | Суммарные<br>доли масс Cs |
|------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Пески, песчаники                         | Не опр.                          | Не опр.                          | 0.006<br>( $1.5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                        | Не опр.                          | 0.006                     |
| Вулканиды кислые                         | Не опр.                          | Не опр.                          | 0.002<br>( $9 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                        | 1.5 (0.02)                       | 1.502                     |
| Вулканиды средние                        | Не опр.                          | Не опр.                          | 0.001<br>( $1.2 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                        | Не опр.                          | 0.001                     |
| Граниты                                  | 0.002<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.009<br>( $1.6 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.1<br>( $2.2 \cdot 10^{-4}$ )   | 1.8<br>(0.012)                 | Не опр.                          | 1.911                     |
| Гранодиориты                             | Не опр.                          | Не опр.                          | 0.001<br>( $8 \cdot 10^{-7}$ )   | Не опр.                        | Не опр.                          | 0.001                     |
| Парасланцы                               | Не опр.                          | Не опр.                          | 0.037<br>( $4.4 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                        | Не опр.                          | 0.037                     |
| Метакарбонатные                          | Не опр.                          | Не опр.                          | 0.021<br>( $1.3 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                        | Не опр.                          | 0.021                     |
| Гранито-гнейсы                           | 0.002<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.012<br>( $1.6 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                          | Не опр.                        | Не опр.                          | 0.014                     |
| Верхняя часть<br>континентальной<br>коры | 0.001<br>( $7.1 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.004<br>( $5.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.02<br>( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )  | 0.2<br>( $9.9 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.018<br>( $8.8 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.243                     |

тоидах, содержащих до 0.0018% Cs, его содержание во всех минералах < 0.11%. В биотите коэффициенты концентрации (КК) Cs 4.4–18.2, средний – 10.2. В мусковите КК Cs 0.7–6.2, средний – 3.3. Следовательно, появление Cs-биотита и Cs-мусковита возможно преимущественно в таких гранитах, где валовое содержание Cs соответственно > 0.011 и > 0.033%. Экстраполяция показала, что содержанием Cs > 0.011 характеризуются около 0.25% массы гранитов. Среднее содержание биотита в гранитах, по последнему расчету автора, 4.8%. Следовательно, вероятная величина среднего содержания Cs-биотита в гранитах 0.012%. Масса же участков с содержанием Cs > 0.033% настолько мала, что определение ее пока затруднительно.

Cs-стекло (включая продукты его раскристаллизации) встречено только как главный компонент вулканических пород кислого и среднего состава с содержанием Cs не меньше 0.1% (Геохимия мезозойских..., 1984; Лебедева, Шаткова, 1975). Расчет, аналогичный приведенному выше, показал, что вероятное среднее содержание Cs-стекла (Cs > 0.11%) в кислых вулканидах 0.02%. Для определения среднего его содержания в средних вулканидах данных пока недостаточно.

Расчет с использованием имеющихся данных показал, что в верхней части континентальной коры в максиминералах (включая Cs-стекло) сконцентрировано около 0.24% массы Cs (табл. 2.24). В гранитах сконцентрированная в максиминералах доля массы Cs почти в 8 раз больше, но не исключено, что это – результат относительно хорошей изученности гранитов.

#### 2.4.4. Обсуждение полученных данных

Среднее содержание Cs и распределение его массы в ассоциации горных пород континентальной коры определены на основе обширного фактического материала, но для Cs характерны большие вариации содержания в горных породах при повышенной тенденции к концентрации в отдельных участках. Поэтому желательно уточнение установленных величин по мере накопления новых анализов горных пород, особенно осадочных, парапетаморфических и вулканогенных. Данные, характеризующие роль цезиевых максиминералов, – первое приближение к истине. Главный их недостаток – почти полное отсутствие прямых определений содержания цезиевых максиминералов в распространенных горных породах. Особенного внимания заслуживают осадочные и парапетаморфические породы. В них и в циркулирующих здесь подземных водах, возможно, находится основная и наиболее доступная часть потенциально извлекаемого Cs. Но получение данных о ней возможно только при специальных трудоемких исследованиях. Полученные цифры следует рассматривать как минимально возможные.

#### 2.4.5. Выводы

Среднее содержание Cs в верхней части континентальной коры  $5.5 \cdot 10^{-4} \%$ , в глинистых и кислых вулканических породах –  $1.3 \cdot 10^{-3}$  и  $1.5 \cdot 10^{-3} \%$ . Распределение Cs в горных породах очень неравномерное. В кислых и средних вулканитах почти 1/4 масс Cs сконцентрирована в участках с содержанием  $> 1 \cdot 10^{-2} \%$ . К цезиевым максиминералам отнесены его собственные минералы и те разновидности чужих, где содержание Cs не меньше 0.11%. Данных о распределении цезиевых минералов в широко распространенных горных породах нет. Установлено, что в верхней части континентальной коры в цезиевых максиминералах сконцентрировано 0.243% всей массы Cs, в том числе, %: Cs-биотите – 0.2, берилле – 0.02, Cs-стекле – 0.018, лепидолите – 0.004, протолитиионите – 0.001. Эти цифры минимально возможные.

### Глава 3

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЩЕЛОЧНО-ЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

---

### 3.1. БЕРИЛЛИЙ

#### 3.1.1. Среднее содержание и распределение масс Ве в верхней части континентальной коры

Новый расчет среднего содержания Ве в горных породах выполнен с учетом результатов количественных анализов более 10 000 проб горных пород (в основном с территории бывшего СССР). Анализы преимущественно заимствованы из литературы. Не учитывались результаты изучения рудных полей редкометалльных месторождений, а также данные из таких публикаций, где осадочные и магматические породы не разделены с продуктами их метаморфизма. Главные источники данных: осадочные породы (Гавшин, Бахтуров, 1989; Маслов и др., 2004; Hirst, 1962); вулканиты осадочного слоя (Аксаментова, 2003; Горкун и др., 1963; Иванов и др., 1980; Иванов и др., 2006; Карапетян, Меликсетян, 1981; Лебедева, 1981; Леонова, Кисанов, 1974; Пополитов, Волынец, 1981; Таусон, Захаров, 1971; Хворостов, Зайцев, 1983); магматиты гранитно-гнейсового слоя (Антипин, 1977; Антонов, 2007; Баженов и др., 1980; Батиева, Бельков, 1985; Беус, 1960; Залашкова, 1960; Коваль и др., 1978; Козлов, 1972; Конев, 1982; Корнев и др., 1974; Косалс и др., 1973; Кузнецов и др., 2006; Недашковский и др., 1970; Павленко и др., 1974; Серых и др., 1969); метаморфические породы (Буданова, 1991; Воинов, Полеховский, 1985; Волчек, 2004; Говоров и др., 1970; Злобин, 1989; Макрыгина, Петрова, 1996; Петров, Макрыгина, 1975; Петрова, Левицкий, 1984; Петрова и др., 2000; Петрова, Макрыгина, 1994; Buttler, 1966). Использованы также результаты количественных анализов 3989 проб уральских и западно-сибирских горных пород, выполненных для различных исследователей, в том числе и для автора, в спектральной лаборатории Института геологии и геохимии УрО РАН и частично опубликованные (Покровский, 1976; Григорьев, 1984; Бушляков, Григорьев, 1988; Бушляков, Григорьев, 1994). Полученные цифры (табл. 3.1) близки к тем, которые были опубликованы раньше (Григорьев, 2003). Среднее содержание Ве в верхней части континентальной коры  $2.3 \cdot 10^{-4} \%$  не выходит за пределы значений  $1.3 \cdot 10^{-4}$ – $3.1 \cdot 10^{-4} \%$ , приводившихся в последние годы другими исследователями (Rudnick, Gao, 2004), подтверждающая известную закономерность: среднее содержание Ве максимально в гранитах, сиенитах и кислых вулканитах, однако в этих горных породах находится всего 16.84% массы

Таблица 3.1  
Среднее содержание и распределение масс Be, Mg, Ca, Sr, Ba в ассоциации горных пород верхней части континентальной коры

| Горные породы                             | Масса пород, % | Среднее содержание, % |             |             |              |                    | Доли масс, % |              |              |              |               |
|-------------------------------------------|----------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|                                           |                | Be                    | Mg          | Ca          | Sr           | Ba                 | Be           | Mg           | Ca           | Sr           | Ba            |
| Пески и песчаники                         | 5.11           | 0.00017               | 1.12        | 2.83        | 0.022        | 0.037              | 3.79         | 3.23         | 3.72         | 4.16         | 3.71          |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4           | 0.0003                | 1.65        | 2.21        | 0.024        | 0.046              | 13.62        | 9.68         | 5.91         | 9.24         | 9.38          |
| Карбонатные породы                        | 3.85           | 0.00003               | 3.45        | 27.43       | 0.038        | 0.03               | 0.5          | 7.5          | 27.15        | 5.42         | 2.72          |
| Кремнистые породы                         | 0.33           | 0.00013               | 0.56        | 1.01        | 0.011        | 0.09               | 0.19         | 0.1          | 0.09         | 0.13         | 0.19          |
| Эвапориты                                 | 0.26           | 0.00007               | 0.24        | 7.09        | 0.096        | 0.042              | 0.79         | 0.04         | 0.47         | 0.92         | 0.21          |
| Кислые вулканы                            | 0.44           | 0.00032               | 0.22        | 0.79        | 0.024        | 0.048              | 0.62         | 0.05         | 0.09         | 0.39         | 0.41          |
| Средние вулканы                           | 1.13           | 0.00014               | 0.85        | 4.44        | 0.039        | 0.041              | 0.69         | 1.18         | 1.29         | 1.63         | 0.91          |
| Основные вулканы                          | 2.11           | 0.00013               | 3.92        | 7.2         | 0.044        | 0.039              | 1.2          | 4.67         | 3.9          | 3.44         | 1.61          |
| Граниты                                   | 8.21           | 0.00045               | 0.33        | 1.11        | 0.015        | 0.075              | 16.13        | 1.53         | 2.34         | 4.56         | 12.07         |
| Гранодиориты                              | 3.38           | 0.00018               | 1.1         | 2.4         | 0.044        | 0.056              | 2.66         | 2.1          | 2.08         | 5.51         | 3.71          |
| Базиты                                    | 1.5            | 0.0001                | 4.3         | 6.29        | 0.046        | 0.029              | 0.65         | 3.64         | 2.43         | 2.56         | 0.85          |
| Сyenиты                                   | 0.05           | 0.00041               | 1.06        | 2.7         | 0.02         | 0.16               | 0.09         | 0.03         | 0.04         | 0.04         | 0.16          |
| Ультрабазиты                              | 0.05           | 0.00002               | 14.56       | 3.99        | 0.0007       | 8·10 <sup>-5</sup> | <0.01        | 0.41         | 0.05         | <0.01        | <0.01         |
| Метапесчаники                             | 2.92           | 0.00016               | 1.33        | 1.77        | 0.013        | 0.038              | 2.04         | 2.19         | 1.33         | 1.41         | 2.17          |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56          | 0.00026               | 1.8         | 2.72        | 0.026        | 0.044              | 34.7         | 31.04        | 21.37        | 29.43        | 26.37         |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13           | 0.00008               | 8.09        | 22.69       | 0.058        | 0.036              | 0.4          | 5.16         | 6.59         | 2.43         | 0.8           |
| Железистые породы                         | 0.38           | 0.00006               | 1.81        | 2.11        | 0.016        | 0.028              | 0.1          | 0.39         | 0.21         | 0.23         | 0.21          |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21          | 0.00018               | 1.34        | 2.34        | 0.025        | 0.07               | 18.24        | 17.55        | 13.96        | 21.49        | 31.86         |
| Метариолиты                               | 0.66           | 0.0003                | 0.73        | 1.53        | 0.02         | 0.069              | 0.87         | 0.27         | 0.26         | 0.49         | 0.89          |
| Метаандезиты                              | 1.03           | 0.00027               | 2.17        | 3.72        | 0.031        | 0.024              | 1.21         | 1.26         | 0.99         | 1.18         | 0.49          |
| Метабазиты                                | 3.29           | 0.00015               | 4.28        | 6.66        | 0.04         | 0.02               | 2.16         | 7.95         | 5.63         | 4.87         | 1.29          |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>     | <b>0.00023</b>        | <b>1.77</b> | <b>3.89</b> | <b>0.027</b> | <b>0.051</b>       | <b>99.95</b> | <b>99.97</b> | <b>99.99</b> | <b>99.53</b> | <b>100.01</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95          | 0.00021               | 1.83        | 7.28        | 0.027        | 0.041              | 19.19        | 20.55        | 37.34        | 19.87        | 16.21         |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68           | 0.00016               | 2.84        | 5.59        | 0.04         | 0.041              | 2.5          | 5.9          | 5.28         | 5.46         | 2.93          |
| <b>Осадочный слой</b>                     | <b>23.63</b>   | <b>0.0002</b>         | <b>1.98</b> | <b>7.02</b> | <b>0.029</b> | <b>0.041</b>       | <b>20.69</b> | <b>26.45</b> | <b>42.62</b> | <b>25.33</b> | <b>19.14</b>  |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19          | 0.00034               | 1.04        | 2.05        | 0.026        | 0.065              | 19.54        | 7.71         | 6.94         | 12.67        | 16.79         |
| Параметаморфиты                           | 34.99          | 0.00024               | 1.96        | 3.28        | 0.026        | 0.043              | 37.23        | 38.78        | 29.50        | 33.5         | 29.55         |
| Ортометаморфиты                           | 28.19          | 0.00018               | 1.7         | 2.88        | 0.027        | 0.062              | 22.4         | 27.03        | 20.84        | 28.03        | 34.53         |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой</b>            | <b>76.37</b>   | <b>0.00024</b>        | <b>1.71</b> | <b>2.92</b> | <b>0.026</b> | <b>0.054</b>       | <b>79.37</b> | <b>73.52</b> | <b>57.28</b> | <b>74.2</b>  | <b>80.87</b>  |



Be. Больше половины его массы (59.63%) находится в метаморфических породах. Распределение Be в верхней части континентальной коры практически соответствует требованиям геохимического баланса. Его среднее содержание в континентальных осадочных породах  $2.1 \cdot 10^{-4} \%$ . Оно практически равно тому ( $2 \cdot 10^{-4} \%$ ), которое могло быть заимствовано от гранитно-гнейсового слоя современного состава при его выветривании (расчет изотопно-алюминиевым методом).

### **3.1.2. Вариации концентрации масс Be в горных породах**

Основа расчета – частота встречаемости проб с разным содержанием Be. Главные источники данных перечислены выше. Учтены результаты количественных анализов отдельных проб горных пород и средние из 2–10 определений. Обобщения результатов более 10 анализов учитывались, как правило, только при наличии данных, позволяющих приблизительно определить количество проб с разным содержанием Be. Установлена тенденция зависимости характера распределения масс Be от его среднего содержания в горных породах (табл. 3.2). В гранитах, сиенитах и кислых вулканитах в участках с содержанием Be повышенным ( $4 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3} \%$ ) и высоким ( $1 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-3} \%$ ) сконцентрировано около 70% его масс. В глинах, глинистых сланцах, парагнейсах и парасланцах в таких участках находится около половины масс Be. В остальных горных породах роль подобных участков как носителей Be существенно меньше. Наибольший интерес представляют участки горных пород с содержанием Be  $> 0.001 \%$ . Для них характерно наличие акцессорных бериллиевых минералов (Григорьев, 1999). Такими участками представлено от 0.15 до 8.15% масс большинства горных пород.

### **3.1.3. О вероятной роли бериллиевых минералов как носителей Be**

Главная форма нахождения Be в верхней части континентальной коры – изоморфная примесь в плагиоклазах, слюдах, амфиболах, смектитах, везувиане, эпидоте, в кальциевых и алюминиевых фосфатах, в некоторых карбонатах и гидроксидах. Содержание Be в этих минералах в абсолютном большинстве случаев меньше 0.09% – минимальное для максиминералов (Григорьев, 1999). В масштабах верхней части континентальной коры максиминералами Be пока могут считаться только его собственные минералы. Акцессорные бериллиевые минералы установлены в большинстве горных пород. Отметим горные породы с самыми низкими значениями содержания Be, в которых достоверно установлены бериллиевые минералы: граниты Юты в США (0.001–0.0015% Be), содержащие берилл (Griffitts, Oda, 1960); позднегерцинский лейкократовый гранит Центрального Казахстана (проба 5186, 0.0024% Be), содержащий берилл (Серых и др., 1969); аляскит из Чаткальского района Тянь-Шаня (проба 368, 0.0011% Be), содержащий гадолинит (Редкие элементы..., 1972); гранитный пегматит Улканского массива,

Т а б л и ц а   3 . 2

**Соотношение масс горных пород с разным содержанием Ве и распределение в них масс Ве**

| Горные породы                | Среднее<br>содержание<br>Ве, $n \cdot 10^{-4} \%$ | Количество<br>проб | Доли масс горных пород с содержанием Ве |                        |                                      |                        | Доли масс Ве в горных породах с его содержанием |                        |                                      |                        |
|------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|
|                              |                                                   |                    | $< 1 \cdot 10^{-4} \%$                  | $1-4 \cdot 10^{-4} \%$ | $4 \cdot 10^{-4}-1 \cdot 10^{-3} \%$ | $1-5 \cdot 10^{-3} \%$ | $< 1 \cdot 10^{-4} \%$                          | $1-4 \cdot 10^{-4} \%$ | $4 \cdot 10^{-4}-1 \cdot 10^{-3} \%$ | $1-5 \cdot 10^{-3} \%$ |
| Граниты                      | 4.5                                               | 3157               | 21.8                                    | 36.75                  | 34.47                                | 6.93                   | 6.06                                            | 24.17                  | 46.34                                | 23.43                  |
| Сyenиты                      | 4.1                                               | 835                | 32.93                                   | 30.06                  | 28.86                                | 8.15                   | 8.04                                            | 21.86                  | 43.18                                | 26.92                  |
| Кислые вулканиты             | 3.2                                               | 417                | 60.18                                   | 11.51                  | 21.83                                | 6.48                   | 18.06                                           | 10.46                  | 43.52                                | 27.95                  |
| Метариолиты                  | 3                                                 | 425                | 45.4                                    | 30.35                  | 22.12                                | 2.13                   | 16.44                                           | 29.94                  | 43.62                                | 10                     |
| Глины и глинистые<br>сланцы  | 3                                                 | 251                | 44.63                                   | 35.06                  | 18.72                                | 1.59                   | 19.32                                           | 31                     | 40.34                                | 9.34                   |
| Парагнейсы и пара-<br>сланцы | 2.6                                               | 891                | 49.82                                   | 29.06                  | 19.85                                | 1.27                   | 19.14                                           | 31.78                  | 41.47                                | 7.61                   |
| Гранодиориты                 | 1.8                                               | 657                | 52.21                                   | 36.99                  | 10.65                                | 0.15                   | 3.58                                            | 59.22                  | 36.12                                | 1.08                   |
| Гранитогайсы                 | 1.8                                               | 454                | 67.63                                   | 21.14                  | 11.23                                | Не обн.                | 32.1                                            | 35.74                  | 32.16                                | Не обн.                |
| Пески и песчаники            | 1.7                                               | 208                | 75.49                                   | 23.55                  | 0.48                                 | 0.48                   | 55.66                                           | 37.07                  | 1.6                                  | 5.67                   |
| Металесчаники                | 1.6                                               | 206                | 72.34                                   | 20.37                  | 7.29                                 | Не обн.                | 39.16                                           | 33.59                  | 27.25                                | Не обн.                |
| Метабазиты                   | 1.5                                               | 455                | 81.54                                   | 11.42                  | 5.94                                 | 1.1                    | 42.39                                           | 21.27                  | 25.78                                | 10.56                  |
| Средние вулканиты            | 1.4                                               | 690                | 83.91                                   | 7.83                   | 8.26                                 | 0.45                   | 47.33                                           | 16.81                  | 30.06                                | 5.8                    |
| Основные вулканиты           | 1.3                                               | 808                | 79.4                                    | 18.77                  | 1.83                                 | Не обн.                | 50.6                                            | 41.65                  | 7.75                                 | Не обн.                |
| Базиты                       | 1                                                 | 365                | 77.03                                   | 19.82                  | 2.7                                  | 0.45                   | 21.88                                           | 54.85                  | 15.67                                | 7.6                    |
| Метакarbonаты                | 0.8                                               | 316                | 90.51                                   | 7.91                   | 1.26                                 | 0.32                   | 46.23                                           | 26.41                  | 7.98                                 | 19.38                  |

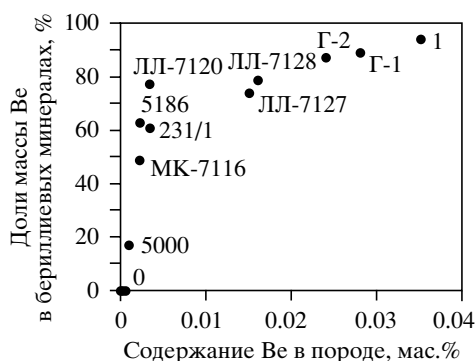
находящегося на Алданском щите в Сибири (0.001% Be), содержащий берилл (Недашковский и др., 1969); содержащие берилл коры выветривания гранитоидов южной части Адуйского массива на Среднем Урале: пегматоидного гранита (проба ЛЛ-7120, 0.0034% Be) и гранитного пегматита (проба МК-7116, 0.0024% Be) (Григорьев, 1999); мусковитизированный филлит из литогеохимического ореола Боевского берилл-флюоритового месторождения на Урале (проба 4003, 0.004% Be), содержащий берилл (Григорьев, 1999); делювий, сложенный продуктами выветривания метаморфизованных терригенных пород (литогеохимический ореол Боевского месторождения, разрез № 34, 0.0011% Be), содержащий берилл (Григорьев, 1984). Данные о наличии ближе не определенных бериллиевых минералов в аллювии с содержанием Be < 0.0005% (Griffitts, Oda, 1960) требуют уточнения. Автору не известны случаи обнаружения бериллиевых минералов в глинах, глинистых сланцах, основных вулканитах, базитах, метабазитах, сиенитах, метапесчаниках и гранитогнейсах с валовым содержанием Be < 0.005%.

Данных о содержании бериллиевых минералов в горных породах (Арсеньева и др., 1969; Григорьев, 1984; Ляхович, 1967; Пятенко, 1971; Руб, 1970; Серых и др., 1969) мало, поэтому традиционный расчет их среднего содержания здесь некорректен, приблизительный расчет выполнен по результатам определений минеральных балансов Be в немногочисленных пробах. Основа расчета – прямая зависимость суммарной доли массы Be, сконцентрированной во всех имеющихся бериллиевых минералах, от содержания Be в данном участке горной породы (Григорьев, 1999).

Наиболее изучены **граниты** и близкие к ним по составу породы. Для них определены десятки минеральных балансов Be, в том числе 10 – для разновидностей, содержащих бериллиевые минералы. Вариации роли бериллиевых минералов в гранитах, гранитных пегматитах и в бериллоносных корах их выветривания подчиняются единой закономерности (рис. 2) и могут рассматриваться совместно (Григорьев, 1999). Здесь бериллиевые минералы появляются при валовом содержании Be > 0.001%. При валовом содержании Be 0.001–0.005% в бериллиевых минералах сконцентрировано 17–63% его массы, а в среднем 1/4 ее часть (Григорьев, 1999). В участках гранитов с таким содержанием Be находится 23.43% всей его массы (см. табл. 3.2). Следовательно, в гранитах, в целом, в бериллиевых минералах сконцентрировано 5.9% всей массы Be.

Рис. 2. Прямая зависимость долей масс Be, сконцентрированных в бериллиевых минералах, от содержания Be в гранитоидах и корах выветривания бериллоносных гранитоидов.

5000 и 5186 – биотитовые граниты из Казахстана (Серых и др., 1969); МК-7116, Г-2, Г-1 и 1 – коры выветривания гранитных пегматитов Адуйского массива на Урале (Григорьев, 1999); 263/1 – лейкогранит из Казахстана (Серых и др., 1969); ЛЛ-7120, ЛЛ-7128 – коры выветривания пегматоидных гранитов Адуйского массива на Урале (Григорьев, 1999); ЛЛ-7127 – гранитный пегматит Адуйского массива на Урале (Григорьев, 1999)



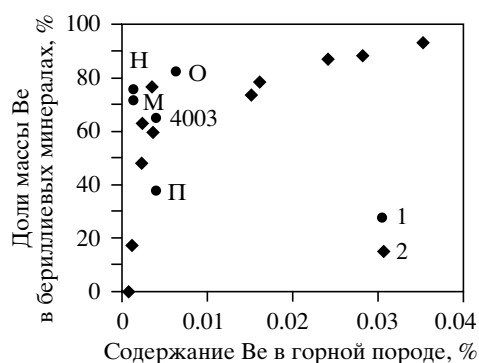


Рис. 3. Положение эталонных проб различных горных пород на графике зависимости долей масс Ве, сконцентрированных в бериллиевых минералах, от содержания Ве в гранитоидах и корях их выветривания.

Точками показаны пробы гранитоидов и кор их выветривания.

Пробы прочих горных пород: 1 – из литогеохимического ореола Боёвского берилл-флюоритового месторождения (Григорьев, 1999), П – супесь, 4003 – филлит, М – мусковитизированный мергель, Н – флюоритизированный и мусковитизированный известняк; 2 – О – ортофир с Украины (Пятенко, 1971)

Для других горных пород имеются эпизодические данные. Бериллиевые минералы обнаружены только в отдельных пробах из ореолов редкометалльных проявлений. В отдельных случаях данных достаточно для определения минеральных балансов Ве в конкретных пробах. Результаты расчетов дают основания предполагать, что зависимость долей масс Ве, сконцентрированных в бериллиевых минералах, от содержания Ве в исследованных горных породах близка к той, которая установлена в гранитоидах и корях их выветривания (рис. 3). Поэтому возможны ориентировочные определения вероятных средних долей масс Ве, сконцентрированных в бериллиевых минералах некоторых горных пород. Способ определения – интерполяция с учетом данных табл. 3.2 и результатов исследования проб, выбранных в качестве эталонных. При расчетах учтено вероятное влияние на распределение Ве разницы минерального состава горных пород: среднего и представляющего выбранные эталоны.

Для **кислых и средних вулканитов** в качестве эталона разновидностей с бериллиевыми минералами принят микроклинизированный ортофир из европейской части СССР с содержанием Ве 0.064% и суммарной долей массы Ве 82%, сконцентрированной в гадолините и берtrandите (Пятенко, 1971). Для остальных горных пород такими эталонами были пробы из литогеохимического ореола Боевского берилл-флюоритового месторождения (Григорьев, 1999). Эталон для **песков и песчаников** – проба П существенно песчаного делювия (подпочва, горизонт С) с содержанием Ве 0.004% и долей массы Ве, сконцентрированной в берилле, – 38%. Эталон для **парагнейсов и парасланцев** – проба 4003 метаморфизованного и минерализованного филлита с содержанием Ве 0.004% и долей массы Ве, сконцентрированной в берилле, – 64%. Эталоны для **метакарбонатных пород** – пробы «М» (минерализованный мрамор) и «Н» (метаморфизованный и минерализованный мергель) с содержанием Ве 0.014 и 0.012%, долями масс Ве, сконцентрированными в берилле, 71 и 75%, соответственно.

По расчету, в верхней части континентальной коры суммарная доля массы Ве, сконцентрированная в бериллиевых минералах, 1.29% (табл. 3.3). В осадочном слое наиболее существенной концентрацией Ве в бериллиевых минералах характеризуются кислые вулканиты, в гранитно-гнейсовом слое максимальная концентрация – в гранитах и метаморфических породах существенно карбонатного состава, но последнее требует проверки, по-

Таблица 3.3

**Доли массы Ве, сконцентрированные в бериллиевых минералах  
(в скобках – содержание минералов)**

| Минералы    | Среднее содержание Ве в минералах, % | Пески и песчаники          | Кислые вулканы             | Средние вулканы                    |
|-------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Гадолит     | 3.4                                  | Не опр.                    | Не опр.                    | $< 0.01 (1 \cdot 10^{-9})$         |
| Берилл      | 4.5                                  | $0.4 (1.5 \cdot 10^{-5})$  | $0.13 (9 \cdot 10^{-6})$   | $0.04 (1.2 \cdot 10^{-6})$         |
| Гельвин     | 4.8                                  | Не опр.                    | Не опр.                    | Не опр.                            |
| Хризоберилл | 6.7                                  | $0.1 (2.5 \cdot 10^{-6})$  | Не опр.                    | Не опр.                            |
| Берtrandит  | 14.3                                 | Не опр.                    | $0.4 (9 \cdot 10^{-6})$    | $0.15 (1.5 \cdot 10^{-6})$         |
| Фенакит     | 15.8                                 | $0.09 (1 \cdot 10^{-6})$   | Не опр.                    | Не опр.                            |
| Бехоит      | 20                                   | Не опр.                    | $0.25 (4 \cdot 10^{-6})$   | Не опр.                            |
| Всего       | –                                    | $0.59 (1.9 \cdot 10^{-5})$ | $0.78 (2.2 \cdot 10^{-5})$ | $0.19 (2.7 \cdot 10^{-6})$         |
| Минералы    | Граниты                              | Парасланцы                 | Метакарбонаты              | Верхняя часть континентальной коры |
| Гадолит     | $0.38 (5.6 \cdot 10^{-5})$           | Не опр.                    | Не опр.                    | $0.06 (4 \cdot 10^{-6})$           |
| Берилл      | $2.2 (2.2 \cdot 10^{-4})$            | $0.76 (4.4 \cdot 10^{-5})$ | $0.73 (1.3 \cdot 10^{-5})$ | $0.65 (3.3 \cdot 10^{-5})$         |
| Гельвин     | $0.64 (6 \cdot 10^{-5})$             | Не опр.                    | $0.3 (5 \cdot 10^{-6})$    | $0.1 (5 \cdot 10^{-6})$            |
| Хризоберилл | $0.67 (4.5 \cdot 10^{-5})$           | Не опр.                    | $0.42 (5 \cdot 10^{-6})$   | $0.11 (3.9 \cdot 10^{-6})$         |
| Берtrandит  | $0.95 (3 \cdot 10^{-5})$             | Не опр.                    | $1.07 (6 \cdot 10^{-6})$   | $0.17 (2.7 \cdot 10^{-6})$         |
| Фенакит     | $1.05 (3 \cdot 10^{-5})$             | $0.04 (7 \cdot 10^{-7})$   | $1.38 (7 \cdot 10^{-6})$   | $0.2 (2.9 \cdot 10^{-6})$          |
| Бехоит      | Не опр.                              | Не опр.                    | Не опр.                    | $< 0.01 (1.8 \cdot 10^{-8})$       |
| Всего       | $5.89 (4.4 \cdot 10^{-4})$           | $0.8 (4.5 \cdot 10^{-5})$  | $3.9 (3.6 \cdot 10^{-5})$  | $1.29 (5.2 \cdot 10^{-5})$         |

сколькo данных о метакaрбонaтных порoдах мaло. В грaнодиоритaх в бериллиевых минерaлах сконцентрирoвaно вceгo 0.02% мaccы Ве.

Разделение суммарных долей мaccы Ве, сконцентрирoванных в бериллиевых минерaлах, между конкретными минерaлами (табл. 3.3) прoведено приближенно соответcтвенно частоте упoминаний последних в литературе. Установлено, что в верхней части континентальной коры в целом роль берилла соизмерима с суммарной ролью остальных бериллиевых минералов, но в вулкaнитах наиболее значительна роль берtrandита и бехoита, а в метакaрбонaтных порoдах – берtrandита и фенакита.

### 3.1.4. Обсуждение полученных данных

Распределение мaccы Ве в ассоциации континентальных горных пород определено на основе обширного фактического материала. На этой стадии исследований эту часть данных можно считать корректной. Ее уточнение возможно после разработки более совершенной модели верхней части континентальной коры и может быть доступно исследователям, имеющим первичные результаты геохимического опробования значительных территорий. Данные, характеризующие роль бериллиевых минералов как носителей Ве, – первое приближение к истине. Они нуждаются в уточнении. Но это возможно только при специальных трудоемких исследованиях.

### 3.1.5. Выводы

Среднее содержание Be в верхней части континентальной коры  $2.3 \cdot 10^{-4} \%$ . Для каждой горной породы определено распределение масс Be по участкам с его содержаниями: низким ( $< 1 \cdot 10^{-4} \%$ ), средним ( $1 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4} \%$ ), повышенным ( $4 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3} \%$ ) и высоким ( $> 1 \cdot 10^{-3} \%$ ). Наиболее интересны участки горных пород с содержанием Be  $> 0.001 \%$ , для которых характерно наличие акцессорных бериллиевых минералов. Такие участки представляют от 0.15 до 8.15% масс большинства горных пород. В гранитах, сиенитах, кислых вулканитах, в таких участках сконцентрировано 23.43–27.95% масс Be. В верхней части континентальной коры в бериллиевых минералах сконцентрировано 1.29% всей массы Be, в том числе, %: в берилле – 0.65, фенаките – 0.2, берtrandите – 0.17, хризоберилле – 0.11, гельвине – 0.1, гадолините – 0.06, бехоите  $< 0.01$ .

## 3.2. МАГНИЙ И КАЛЬЦИЙ

### 3.2.1. Среднее содержание и распределение масс Mg и Ca в верхней части континентальной коры

Средние содержания Mg и Ca в горных породах (табл. 3.1) соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2003). Большинство значений с небольшими поправками было принято по А.Б. Ронову с коллегами (1990). Зависимость средних содержаний Mg и Ca от состава распространенных горных пород сильная. Средние коэффициенты концентрации Mg 0.12–8.23, Ca 0.26–7.05. Максимальные коэффициенты концентрации: у Mg – в ультрабазилах, у Ca – в карбонатных породах. Распределение масс Mg и Ca в верхней части континентальной коры сходное. Больше половины масс находится в карбонатных породах (Mg 59.33, Ca 66.84%). Главные породы-носители у Mg метакарбонатные гранитно-гнейсового слоя, у Ca – карбонатные осадочного слоя. Оба элемента «избыточные». Их содержание в осадочных породах больше, чем должно быть в продуктах выветривания гранитно-гнейсового слоя современного состава. Сравним эти элементы с Al. Подвижность его при выветривании в абсолютном большинстве случаев минимальная. Коэффициенты концентрации (КК) в осадочных породах по отношению к гранитно-гнейсовому слою, мас. %: Mg 1.07, Ca 2.49, Al 0.81. Похожая ситуация и в параметаморфических породах (КК в параметаморфических породах в отношении ортометаморфических: Mg 1.15, Ca 1.13, Al 0.92, КК в параметаморфических породах в отношении магматических: Mg 1.07, Ca 2.49, Al 0.81).

### 3.2.2. Средний минеральный баланс Mg и Ca в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах

В литературе имеются многочисленные определения содержания главных породообразующих минералов в горных породах. Опубликованы результаты более 3000 количественных минералогических анализов, в которых учтены акцессорные минералы-концентраторы Mg и Ca, но в отноше-

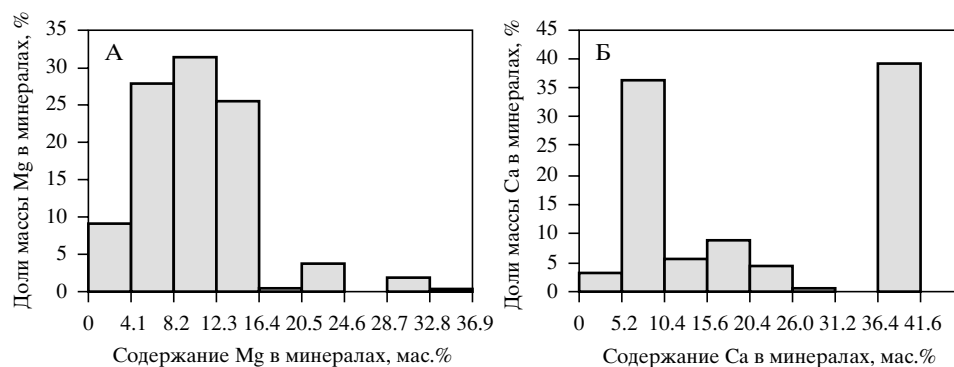


Рис. 4. Распределение масс Mg и Ca, имеющихся в верхней части континентальной коры, по минералам с разным содержанием этих элементов

нии акцессорных минералов многочисленны только данные по пескам, гранитам, гранодиоритам и сиенитам. Средний минеральный состав горных пород, рассчитанный по результатам минералогических анализов, не вполне соответствует их среднему химическому составу, поэтому среднее содержание наиболее важных минералов скорректировано, о чем сказано в главе 1. Исключение составляют бишофит, карналлит и кизерит. Их средние содержания определены пересчетом химического состава эвапоритов на минеральный состав.

**Магний.** В верхней части континентальной коры распределение масс Mg по минералам, %: в магнезиальных – 93.13, в немагнезиальных – 7.65. Распределение масс Mg по минералам с разным его содержанием близко к бимодальному (рис. 4, А). Интервал нехарактерной концентрации: 16.4–20.5% Mg (КК 7.91–11.3) делит всю совокупность минералов на две неравные части (табл. 3.4). Первая представлена миниминералами и кларкминералами, вторая – максиминералами. Миниминералы – это немагнезиальные минералы. В них рассеяно 2.25% масс Mg. Кларкминералы – преимущественно члены изоморфных рядов железомagneзиальных хлоритов, слюд, амфиболов и пироксенов. Важнейшее исключение – кальцит, содержащий в большинстве случаев > 1.77% Mg. Почти вся масса Mg (90.99%) сконцентрирована в кларкминералах. Интервал нехарактерной концентрации представлен преимущественно тальком. Максиминералы – собственно магнезиальные минералы, преимущественно силикаты. В максиминералах сконцентрировано 5.85% масс Mg.

Близкое к бимодальному распределение массы Mg по минералам с разным его содержанием имеет место только в масштабах всей верхней части континентальной коры и в гранитно-гнейсовом слое. В осадочном слое и в каждой из горных пород оно ближе к мономодальному.

В осадочном слое распределение массы Mg, %: в миниминералах 7.21 (5.33 в гидромусковите), кларкминералах 88.4 (17 в кальците и арагоните, 12.4 доломите, 11.6 рипидолите, 10 биотите, 8.07 шамозите, 7.07 авгите, 5.21 роговой обманке, прочих 17.05); в интервале нехарактерной концентрации 1.81 (1.77 в вермикулите), максиминералах 2.18 (1.47 в энстатите,

Таблица 3.4

**Средний минеральный баланс Mg в верхней части континентальной коры**

| Категории минералов<br>как концентраторов Mg | Минералы        | Содержание<br>минералов, % | Содержание<br>Mg, % | Доли масс<br>Mg, % |
|----------------------------------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| Миниминералы КК < 1                          | Гидромусковит   | 2.51                       | 1                   | 1.42               |
|                                              | Прочие          |                            |                     | 0.83               |
|                                              | Всего           |                            | 0.1–1.77            | 2.25               |
| Кларкминералы КК – 1–7.91                    | Монтмориллонит  | 0.43                       | 2.4                 | 0.58               |
|                                              | Кальцит         | 3.98                       | 2.4                 | 5.4                |
|                                              | Гидробиотит     | 0.48                       | 2.76                | 0.75               |
|                                              | Гастингсит      | 0.31                       | 4.63                | 0.81               |
|                                              | Альмандин       | 0.85                       | 3.1                 | 1.49               |
|                                              | Шамозит         | 0.55                       | 6.92                | 2.15               |
|                                              | Биотит          | 7.49                       | 5.1                 | 21.58              |
|                                              | Актинолит       | 0.39                       | 7.78                | 1.71               |
|                                              | Куммингтонит    | 0.46                       | 9.2                 | 2.39               |
|                                              | Роговая обманка | 3.16                       | 9.65                | 17.23              |
|                                              | Авгит           | 1.21                       | 9.65                | 6.6                |
|                                              | Диопсид         | 0.48                       | 9.74                | 2.64               |
|                                              | Гиперстен       | 0.43                       | 9.87                | 2.4                |
|                                              | Доломит         | 0.7                        | 12.7                | 5.02               |
|                                              | Тремолит        | 0.055                      | 13.1                | 0.41               |
|                                              | Клинохлор       | 0.69                       | 13.2                | 5.15               |
|                                              | Рипидолит       | 1.89                       | 13.7                | 14.68              |
|                                              | Прочие          |                            |                     | 15.47              |
|                                              | Всего           |                            |                     | 90.99              |
| ИНК* КК 7.91–11.3                            | Тальк           | 0.046                      | 18.2                | 0.47               |
| Максиминералы КК > 11.3                      | Энстатит        | 0.044                      | 20.82               | 0.52               |
|                                              | Пеннин          | 0.27                       | 21.1                | 3.22               |
|                                              | Оливин          | 0.037                      | 25.6                | 0.54               |
|                                              | Серпентин       | 0.072                      | 25.7                | 1.05               |
|                                              | Магнезит        | 0.015                      | 28.1                | 0.24               |
|                                              | Гумит           | 0.001                      | 28.9                | 0.02               |
|                                              | Клиногумит      | 0.0015                     | 31.2                | 0.03               |
|                                              | Форстерит       | 0.011                      | 34.87               | 0.22               |
|                                              | Брусит          | $2.5 \cdot 10^{-4}$        | 41.6                | 0.01               |
|                                              | Всего           |                            |                     | 5.85               |
| Сумма учтенных долей масс Mg                 |                 |                            |                     | 99.56              |

\* Здесь и в последующих таблицах ИНК – минералы, относящиеся к интервалу нехарактерной концентрации.

0.58 в оливине, 0.1 в магнезите, 0.03 в серпентине). В осадочных (табл. 3.5) и в вулканогенных породах осадочного слоя (табл. 3.6) массы Mg преимущественно сконцентрированы в кларкминералах. В большинстве случаев в максиминералах сконцентрировано < 1% масс Mg. Несколько выделяются лишь основные вулканы, где 3.27% масс Mg сконцентрировано в оливине.



Таблица 3.5

**Доли масс Mg (%), находящиеся в минералах осадочных пород континентальной коры**

| Категории минералов как концентраторов Mg | Минералы      | Пески и песчаники | Глины и сланцы | Карбонатные породы | Кремнистые породы | Осадочные породы |
|-------------------------------------------|---------------|-------------------|----------------|--------------------|-------------------|------------------|
| Миниминералы                              | Гидромусковит | 8.48              | 11.1           | 0.67               | 9.46              | 6.84             |
|                                           | Прочие        | 1.31              | 1.67           | 0.28               | 0.86              | 1.17             |
|                                           | Всего         | 9.79              | 12.77          | 0.95               | 10.32             | 8.01             |
| Кларкминералы                             | Глауконит     | 2.54              | 0.35           | < 0.01             | 20.02             | 0.66             |
|                                           | Кальцит       | 11.8              | 5.82           | 46.6               | 6.43              | 21.57            |
|                                           | Биотит        | 13.7              | 15.5           | 1.48               | Не опр.           | 9.95             |
|                                           | Шамозит       | 12.4              | 16.8           | 1                  | 30.89             | 10.36            |
|                                           | Доломит       | 0.11              | 0.77           | 42.33              | Не опр.           | 15.89            |
|                                           | Рипидолит     | 24.5              | 22.5           | Не опр.            | 24.46             | 14.54            |
|                                           | Прочие        | 23.59             | 20.17          | 6.17               | 3.5               | 15.16            |
|                                           | Всего         | 88.64             | 81.91          | 97.58              | 85.3              | 88.13            |
| ИНК                                       | Всего         | 1.36              | 4.61           | Не опр.            | Не опр.           | 2.41             |
| Максиминералы                             | Магнезит      | Не опр.           | 0.09           | 0.24               | Не опр.           | 0.13             |
| Сумма учтенных долей масс Mg              |               | 99.79             | 99.38          | 98.77              | 95.62             | 98.68            |

Таблица 3.6

**Доли масс Mg (%), находящиеся в минералах вулканогенных пород осадочного слоя континентальной коры**

| Категории минералов как концентраторов Mg | Минералы        | Породы  |         |          |         |
|-------------------------------------------|-----------------|---------|---------|----------|---------|
|                                           |                 | Кислые  | Средние | Основные | В целом |
| Миниминералы и их аналоги                 | Стекло          | 15.9    | 3.03    | 0.73     | 1.34    |
|                                           | Прочие          | 6.03    | 0.58    | 0.65     | 0.85    |
|                                           | Всего           | 21.93   | 3.61    | 1.38     | 2.19    |
| Кларкминералы и их аналоги                | Биотит          | 55.6    | 15.2    | 9.5      | 11.06   |
|                                           | Роговая обманка | 4.39    | 31.3    | 8.62     | 13.12   |
|                                           | Авгит           | 0.88    | 20.9    | 34.5     | 31.46   |
|                                           | Пижонит         | Не опр. | 2.62    | 7.43     | 6.39    |
|                                           | Диопсид         | 0.44    | 4.74    | 9.94     | 8.92    |
|                                           | Гиперстен       | 0.45    | 8       | 17.6     | 15.57   |
|                                           | Прочие          | 19.72   | 7.8     | 4.27     | 4.67    |
|                                           | Всего           | 81.48   | 90.56   | 91.86    | 91.19   |
| ИНК                                       | Всего           | 0.09    | 9       | 5.84     | 6.45    |
| Максиминералы                             | Оливин          | 0.58    | 0.07    | 3.27     | 2.61    |
|                                           | Серпентин       | Не опр. | 0.69    | Не опр.  | 0.14    |
|                                           | Всего           | 0.58    | 0.76    | 3.27     | 2.75    |
| Сумма учтенных долей масс Mg              |                 | 104.08  | 103.93  | 102.35   | 102.58  |

Таблица 3.7

**Доли масс Mg (%), находящиеся в минералах магматических пород  
гранитно-гнейсового слоя**

| Категории минералов<br>как концентраторов Mg | Минералы           | Граниты | Гранодио-<br>риты | Базиты  | Сиениты | Ультра-<br>базиты | В целом |
|----------------------------------------------|--------------------|---------|-------------------|---------|---------|-------------------|---------|
| Миниминералы                                 | Всего              | 0.57    | 0.46              | 0.85    | 2.54    | 0.18              | 0.56    |
| Кларкминералы                                | Биотит             | 74.2    | 40.57             | 6.29    | 7.22    | Не опр.           | 28.6    |
|                                              | Роговая<br>обманка | 14.6    | 26.32             | 14.59   | 4.55    | 2.65              | 17.1    |
|                                              | Авгит              | 2.92    | 13.16             | 18.4    | 77.4    | Не опр.           | 13.1    |
|                                              | Диопсид            | Не опр. | Не опр.           | 18.12   | Не опр. | 7.36              | 8.9     |
|                                              | Рипидолит          | 6.23    | 21.17             | 23.26   | Не опр. | Не опр.           | 17.9    |
|                                              | Прочие             | 2.05    | 1.39              | 5.77    | 12.56   | 3.96              | 3.7     |
|                                              | Всего              | 100     | 102.61            | 86.43   | 101.73  | 13.97             | 89.3    |
| ИНК                                          | Всего*             | Не опр. | Не опр.           | 9.88    | Не опр. | 16.6              | 5.55    |
| Максиминералы                                | Энстатит           | Не опр. | Не опр.           | 0.97    | Не опр. | 21.45             | 1.6     |
|                                              | Пеннин             | Не опр. | 0.96              | 4.91    | Не опр. | Не опр.           | 2.64    |
|                                              | Плеонаст           | Не опр. | Не опр.           | < 0.01  | Не опр. | 0.03              | < 0.01  |
|                                              | Оливин             | Не опр. | Не опр.           | 1.19    | 0.24    | 21.1              | 1.67    |
|                                              | Серпентин          | < 0.01  | Не опр.           | 0.18    | Не опр. | 28.24             | 1.58    |
|                                              | Магнезит           | Не опр. | Не опр.           | Не опр. | Не опр. | 0.39              | 0.02    |
|                                              | Брусит             | Не опр. | Не опр.           | Не опр. | Не опр. | 1.43              | 0.07    |
|                                              | Всего              | < 0.01  | 0.96              | 7.25    | 0.24    | 72.64             | 7.58    |
| Сумма учтенных долей масс Mg                 |                    | 100.57  | 104.03            | 104.41  | 104.51  | 103.39            | 102.99  |

\* В базитах – бронзит, в ультрабазитах – бронзит (16.35) и тальк (0.25).

В гранитно-гнейсовом слое распределение масс Mg, %: в миниминералах 0.68, кларкминералах 93.12 (25.6 биотите, 21.5 роговой обманке, 15.9 рипидолите, 6.38 авгите, 5.94 клинохлоре, прочих 17.8); в минералах интервала нехарактерной концентрации 1.37 массы Mg (бронзите 0.73, тальке 0.64); максиминералах 7.18% масс Mg (4.44 пеннине, 1.41 серпентине, 0.51 оливине, 0.31 форстерите, 0.28 магнезите, 0.17 энстатите, 0.04 клиногумите, 0.02 гумите).

В гранитах, гранодиоритах и сиенитах почти весь Mg сконцентрирован в кларкминералах (табл. 3.7). Среди магматических пород гранитно-гнейсового слоя выделяются базиты и, особенно, ультрабазиты. В последних почти 3/4 масс Mg сконцентрировано в максиминералах, но влияние ультрабазитов на ситуацию во всей совокупности магматических пород умеренное. Параметаморфические породы в целом характеризуются максимальной ролью максиминералов как носителей Mg (табл. 3.8). Это обусловлено в значительной мере минеральным балансом Mg в метакarbonатных породах. В ортометаморфических породах роль максиминералов минимальна (табл. 3.9).

Дополнительно отметим, что перспективные в технологическом отношении бишофит, карналлит и кизерит не являются магниевыми максиминералами, роль их существенна только в эвапоритах. Сконцентрированные в

Таблица 3.8

## Доли масс Mg (%), находящиеся в минералах параметаморфических пород

| Категории минералов как концентраторов Mg | Минералы        | Метапесчаники | Парасланцы | Метакарбонатные породы | Железистые породы | Параметаморфиты |
|-------------------------------------------|-----------------|---------------|------------|------------------------|-------------------|-----------------|
| Миниминералы                              | Всего           | 1.42          | 1.15       | 0.01                   | 4.03              | 1.11            |
| Кларкминералы                             | Биотит          | 24.9          | 25.5       | 0.95                   | 1.41              | 22              |
|                                           | Роговая обманка | 25.4          | 30.6       | 0.95                   | 13.86             | 26.2            |
|                                           | Доломит         | 0.19          | 0.71       | 29.83                  | 1.4               | 4.54            |
|                                           | Клинохлор       | 19.8          | 12.5       | 0.49                   | Не опр.           | 11.2            |
|                                           | Рипидолит       | 17.5          | 10.7       | 1.86                   | 15.9              | 9.93            |
|                                           | Прочие          | 9.84          | 14.65      | 20.53                  | 49.43             | 15.46           |
|                                           | Всего           | 97.63         | 94.66      | 54.61                  | 82                | 89.33           |
| ИНК                                       | Всего*          | Не опр.       | Не опр.    | 10.45                  | Не опр.           | 1.41            |
| Максиминералы                             | Пеннин          | 2.38          | 9.03       | Не опр.                | Не опр.           | 7.43            |
|                                           | Оливин          | Не опр.       | Не опр.    | 4.75                   | Не опр.           | 0.63            |
|                                           | Серпентин       | Не опр.       | 0.03       | 17.81                  | Не опр.           | 2.36            |
|                                           | Магнезит        | Не опр.       | Не опр.    | 3.47                   | 7.76              | 0.53            |
|                                           | Гумит           | Не опр.       | Не опр.    | 0.32                   | Не опр.           | 0.04            |
|                                           | Клиногумит      | Не опр.       | Не опр.    | 0.39                   | 1.72              | 0.07            |
|                                           | Форстерит       | Не опр.       | Не опр.    | 4.94                   | Не опр.           | 0.57            |
|                                           | Всего           | 2.38          | 9.06       | 31.68                  | 9.48              | 11.63           |
| Сумма учтенных долей масс Mg              |                 | 101.43        | 104.87     | 96.75                  | 95.51             | 103.37          |

\* ИНК в карбонатных породах – флогопит (1.45) и тальк (9).

Таблица 3.9

## Доли масс Mg (%), находящиеся в минералах ортометаморфических пород

| Категории минералов как концентраторов Mg | Минералы        | Гранито-гнейсы | Метариолиты | Метаандезиты | Метабазиты | Ортометаморфиты |
|-------------------------------------------|-----------------|----------------|-------------|--------------|------------|-----------------|
| Миниминералы                              | Всего           | 0.14           | 1.88        | 0.45         | 0.25       | 0.17            |
| Кларкминералы                             | Биотит          | 43.8           | 17.5        | 6.58         | 6.91       | 30.2            |
|                                           | Куммингтонит    | Не опр.        | Не опр.     | 8.48         | 12.5       | 4.06            |
|                                           | Роговая обманка | 15.1           | 13.2        | 21.3         | 18         | 16.2            |
|                                           | Авгит           | 7.2            | 5.29        | 6.67         | 20.3       | 11              |
|                                           | Рипидолит       | 28.6           | 37.5        | 22.7         | 12.2       | 23.6            |
|                                           | Прочие          | 9.69           | 21.81       | 28.74        | 27.52      | 16.26           |
|                                           | Всего           | 104.39         | 95.3        | 94.47        | 97.43      | 101.32          |
| ИНК                                       | Флогопит        | Не опр.        | Не опр.     | Не опр.      | 0.39       | 0.12            |
|                                           | Бронзит         | Не опр.        | Не опр.     | Не опр.      | 1.98       | 0.58            |
|                                           | Всего           | Не опр.        | Не опр.     | Не опр.      | 2.37       | 0.7             |
| Максиминерал                              | Пеннин          | Не опр.        | 1.44        | 2.91         | 1.97       | 0.73            |
| Сумма учтенных долей масс Mg              |                 | 104.53         | 98.62       | 97.83        | 100.05     | 102.92          |

них доли массы Mg, %: кизерит 24, карналлит 2.9, бишофит 0.5. Во всей верхней части континентальной сконцентрированные в них доли масс Mg, %: кизерит 0.007, карналлит 0.001, бишофит  $1.7 \cdot 10^{-4}$ .

**Кальций.** В верхней части континентальной коры распределение масс Са по минералам, %: в некальциевых 3,38, в кальциевых 94.59%. Распределение массы Са по минералам с разным его содержанием бимодальное (рис. 4, Б). Интервал нехарактерной концентрации 26–31.2% Са делит всю совокупность минералов на две неравные части (табл. 3.10). Первая представлена миниминералами и кларкминералами, вторая – максиминералами. В миниминералах рассеяно 13.31% массы Са, в кларкминералах сконцентрировано 45.38. Большинство кларкминералов представлено комплексными соединениями, образованными Са совместно с Mg, Fe, Al, Na, Ti. Это преимущественно силикаты. Главные исключения: гипс, доломит и анкерит. В интервале нехарактерной концентрации заметную роль играет только ангидрит. Максиминералы – простые соединения Са: карбонаты, фосфаты, флюорит. В них сконцентрировано 39.21% массы Са (37.5% в кальците).

Осадочный и гранитно-гнейсовый слои резко различаются по минеральному балансу Са. Роль максиминералов в осадочном слое максимальна, в гранитно-гнейсовом – минимальна.

В осадочном слое распределение масс Са следующее, %: в миниминералах 3.87 (1.38 в олигоклазе); кларкминералах 21.55 (6.11 доломите, 4.64 лабрадоре, 2.84 авгите, 2.22 андезине), в интервале нехарактерной концентрации 0.8 (ангидрит); в максиминералах 73.4 (73.3 кальците и арагоните). Осадочные (табл. 3.11) и вулканогенные породы (табл. 3.12) резко отличаются по минеральному балансу Са. В осадочных породах роль максиминералов (прежде всего кальцита) еще больше, чем в слое в целом (84%). В карбонатных же породах почти вся масса Са (92.32%) сконцентрирована в максиминералах, в том числе в кальците 90.98%. Главные миниминералы: олигоклаз, смектиты. В песчаных и глинистых породах главные кларкминералы: андезин, лабрадор, роговая обманка, а в карбонатных породах – доломит. В вулканогенных породах в целом роль максиминералов минимальная, причем она уменьшается от кислых вулканитов к основным. В кислых вулканитах 60.26% массы Са рассеяно в миниминералах и их аналогах, в том числе, %: в стеклах 22.2, санидине 14.7, альбите 8.61, олигоклазе 8.54. Это обстоятельство (также как и заметная роль кальцита) отчасти предопределяется малым валовым содержанием Са в кислых вулканитах. В средних и основных вулканитах почти весь Са сконцентрирован в кларкминералах.

В гранитно-гнейсовом слое распределение масс Са, %: в миниминералах 20.11 (16.3 олигоклазе); кларкминералах 63.87 (13.3 андезине, 11.7 роговой обманке, 8.75 лабрадоре, 8.36 эпидоте, 5.3 авгите); в интервале нехарактерной концентрации 0.25 (везувиан); в максиминералах 13.46 (11.3 в кальците).

В магматических породах гранитно-гнейсового слоя роль максиминералов мала (табл. 3.13), главный среди них – апатит. Лишь в ультрабазитах (включая продукты их метаморфизма) доля массы Са, сконцентрированная в кальците (0.83%), больше, чем в апатите (0.49%). Главные носители Са в магматических породах плагиоклазы, и ситуация в значительной мере опре-

Таблица 3.10

## Средний минеральный баланс Са в верхней части континентальной коры

| Категории минералов<br>как концентраторов Са | Минералы        | Содержание<br>минералов, % | Содержание<br>Са, % | Доли масс<br>Са, % |
|----------------------------------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| Миниминералы КК < 1                          | КПШ             | 9.81                       | 0.2                 | 0.5                |
|                                              | Альбит          | 4                          | 0.4                 | 0.41               |
|                                              | Биотит          | 7.49                       | 0.5                 | 0.96               |
|                                              | Рипидолит       | 1.89                       | 0.74                | 0.36               |
|                                              | Гиперстен       | 0.43                       | 1.24                | 0.14               |
|                                              | Куммингтонит    | 0.46                       | 1.35                | 0.16               |
|                                              | Нонтронит       | 0.57                       | 1.92                | 0.28               |
|                                              | Прочие          |                            |                     | 0.57               |
|                                              | Олигоклаз       | 14.31                      | 2.7                 | 9.93               |
|                                              | Всего           |                            |                     | 13.31              |
| Кларкминералы КК 1–6.43                      | Стекло основное | 0.31                       | 4.8                 | 0.38               |
|                                              | Андезин         | 6.56                       | 5.1                 | 8.6                |
|                                              | Альмандин       | 0.85                       | 6.3                 | 1.38               |
|                                              | Актинолит       | 0.39                       | 7.84                | 0.79               |
|                                              | Гастингсит      | 0.31                       | 8                   | 0.64               |
|                                              | Роговая обманка | 3.16                       | 8.96                | 7.28               |
|                                              | Лабрадор        | 3.02                       | 9                   | 6.99               |
|                                              | Томсонит        | 0.06                       | 9.21                | 0.14               |
|                                              | Тремолит        | 0.055                      | 9.32                | 0.13               |
|                                              | Битовнит        | 0.3                        | 11                  | 0.85               |
|                                              | Лосонит         | 0.24                       | 11.5                | 0.71               |
|                                              | Авгит           | 1.21                       | 13.7                | 4.26               |
|                                              | Эпидот          | 1.17                       | 16.5                | 4.96               |
|                                              | Салит           | 0.05                       | 16.9                | 0.22               |
|                                              | Диопсид         | 0.48                       | 17.3                | 2.14               |
|                                              | Титанит         | 0.18                       | 19.1                | 0.88               |
|                                              | Пренит          | 0.17                       | 19.4                | 0.85               |
|                                              | Доломит         | 0.7                        | 22.1                | 3.98               |
|                                              | Анкерит         | 0.031                      | 24.1                | 0.19               |
|                                              | Везувиан        | 0.027                      | 25.6                | 0.18               |
|                                              | Всего           |                            |                     | 45.38              |
| ИНК КК 6.44–9                                | Ангидрит        | 0.045                      | 29.4                | 0.34               |
|                                              | Карбонат-апатит | 0.0083                     | 35                  | 0.08               |
|                                              | Прочие          |                            |                     | 0.03               |
|                                              | Всего           |                            |                     | 0.45               |
| Максиминералы КК > 9                         | Арагонит        | 0.038                      | 36.7                | 0.36               |
|                                              | Кальцит         | 3.98                       | 36.7                | 37.5               |
|                                              | Апатит          | 0.13                       | 39.4                | 1.32               |
|                                              | Флюорит         | 0.0022                     | 51.3                | 0.03               |
|                                              | Всего           |                            |                     | 39.21              |
| Сумма учтенных долей масс Са                 |                 |                            |                     | 98.35              |

Таблица 3.11

**Доли масс Са (%), находящиеся в минералах осадочных пород континентальной коры**

| Категории минералов как концентраторов Са | Минералы        | Пески и песчаники | Глины и сланцы | Карбонатные породы | Кремнистые породы | Осадочные породы |
|-------------------------------------------|-----------------|-------------------|----------------|--------------------|-------------------|------------------|
| Миниминералы                              | Всего           | 11.06             | 15.18          | 0.21               | 8.45              | 3.7              |
| Кларкминералы                             | Всего           | 12.5              | 13.86          | 9.85               | 32.34             | 11.32            |
| ИНК                                       | Всего           | 0.31              | 0.4            | 0.19               | 5.03              | 1.01             |
| Максиминералы                             | Карбонат-апатит | 0.26              | < 0.01         | Не опр.            | Не опр.           | 0.03             |
|                                           | Арагонит        | Не опр.           | Не опр.        | 1.34               | Не опр.           | 0.96             |
|                                           | Кальцит         | 71.33             | 66.4           | 90.98              | 54                | 82.93            |
|                                           | Апатит          | 0.68              | 0.04           | Не опр.            | 0.19              | 0.08             |
|                                           | Всего           | 72.27             | 66.44          | 92.32              | 54.19             | 84.0             |
| Сумма учтенных долей масс Са              |                 | 96.14             | 95.88          | 102.57             | 100.01            | 100.03           |

Таблица 3.12

**Доли масс Са (%), находящиеся в минералах вулканогенных пород осадочного слоя континентальной коры**

| Категории минералов как концентраторов Са | Минералы        | Породы  |         |          |         |
|-------------------------------------------|-----------------|---------|---------|----------|---------|
|                                           |                 | Кислые  | Средние | Основные | В целом |
| Миниминералы и их аналоги                 | Стекло кислое   | 22.2    | Не опр. | Не опр.  | 0.38    |
|                                           | Олигоклаз       | 8.54    | 5.66    | 0.26     | 1.72    |
|                                           | Прочие          | 29.52   | 1.97    | 2.37     | 2.94    |
|                                           | Всего           | 60.26   | 7.63    | 2.63     | 5.04    |
| Кларкминералы и их аналоги                | Стекло основное | Не опр. | 15.1    | 4.8      | 7.23    |
|                                           | Андезин         | 1.94    | 20.1    | 6.38     | 9.64    |
|                                           | Роговая обманка | 1.13    | 12.1    | 4.36     | 6.19    |
|                                           | Лабрадор        | 0.34    | 27.4    | 34.4     | 32.1    |
|                                           | Битовнит        | 0.14    | 1.98    | 6.11     | 4.92    |
|                                           | Авгит           | 0.35    | 12.3    | 26.7     | 22.8    |
|                                           | Диопсид         | 0.22    | 3.51    | 9.62     | 8.06    |
|                                           | Прочие          | 1.34    | 2.72    | 5.78     | 4.87    |
|                                           | Всего           | 5.46    | 95.21   | 98.15    | 95.81   |
|                                           | Всего           | 5.46    | 95.21   | 98.15    | 95.81   |
| Максиминералы                             | Кальцит         | 38.5    | 1.65    | 1.53     | 2.17    |
|                                           | Апатит          | 0.55    | 0.27    | 0.05     | 0.11    |
|                                           | Флюорит         | 0.05    | Не опр. | Не опр.  | < 0.01  |
|                                           | Всего           | 39.1    | 1.92    | 1.58     | 2.28    |
| Сумма учтенных долей масс Са              |                 | 104.82  | 104.76  | 102.31   | 103.13  |

деляется химическим составом плагиоклазов. В гранитах, где преобладают альбит и олигоклаз, 81.3% массы Са рассеяно в миниминералах. В остальных магматических породах преобладают более основные плагиоклазы. Как следствие в миниминералах рассеяны небольшие доли массы Са (4.73–27.24%). Во всех магматических породах, кроме гранитов, больше половины массы Са сконцентрировано в кларкминералах.

Таблица 3.13

**Доли масс Са (%), находящиеся в минералах магматических пород  
гранитно-гнейсового слоя**

| Категории минералов<br>как концентраторов Са | Минералы           | Граниты | Гранодио-<br>риты | Базиты | Сиениты | Ультра-<br>базиты | В целом |
|----------------------------------------------|--------------------|---------|-------------------|--------|---------|-------------------|---------|
| Миниминералы                                 | Олигоклаз          | 73      | 23.63             | 1.72   | 6       | Не опр.           | 32,3    |
|                                              | Прочие             | 8.33    | 3.61              | 3.01   | 11.3    | 8.59              | 5.06    |
|                                              | Всего              | 81.33   | 27.24             | 4.73   | 17.3    | 8.59              | 37.36   |
| Кларкминералы                                | Андезин            | 8.27    | 51                | 12.2   | 20.8    | Не опр.           | 22.4    |
|                                              | Роговая<br>обманка | 4.04    | 11.2              | 9.26   | 1.66    | 8.98              | 8.04    |
|                                              | Лабрадор           | 1.62    | 2.62              | 27.9   | Не опр. | Не опр.           | 11.1    |
|                                              | Анортит            | Не опр. | Не опр.           | 0.43   | Не опр. | 28.5              | 0.36    |
|                                              | Авгит              | 1.23    | 8.56              | 17.9   | 43.13   | Не опр.           | 9.42    |
|                                              | Диопсид            | Не опр. | Не опр.           | 22     | Не опр. | 47.7              | 8.03    |
|                                              | Прочие             | 3.38    | 3.09              | 7.38   | 9.14    | 8.38              | 4.69    |
|                                              | Всего              | 18.54   | 76.47             | 97.07  | 74.73   | 93.56             | 64.04   |
|                                              | Максиминералы      | Кальцит | 0.4               | 0.31   | 1.22    | 0.83              | 0.34    |
| Максиминералы                                | Апатит             | 2.13    | 1.15              | 0.63   | 1.61    | 0.49              | 1.31    |
|                                              | Флюорит            | 0.25    | 0.01              | < 0.01 | 0.79    | Не опр.           | 0.1     |
|                                              | Всего              | 2.78    | 1.47              | 0.92   | 3.62    | 1.32              | 1.75    |
| Сумма учтенных долей масс Са                 |                    | 102.65  | 105.18            | 102.72 | 95.65   | 103.47            | 103.15  |

Таблица 3.14

**Доли масс Са (%), находящиеся в минералах параметаморфических пород**

| Категории минералов<br>как концентраторов Са | Минералы           | Метапес-<br>чаники | Парасланцы | Метакарбонат-<br>ные породы | Железистые<br>породы | Парамета-<br>морфиты |
|----------------------------------------------|--------------------|--------------------|------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| Миниминералы                                 | Олигоклаз          | 9.92               | 11.9       | 0.08                        | 3.84                 | 9.12                 |
|                                              | Прочие             | 6.97               | 4.85       | 0.21                        | 8.95                 | 3.9                  |
|                                              | Всего              | 16.89              | 16.75      | 0.29                        | 12.79                | 13.02                |
| Кларкминералы                                | Андезин            | 2.59               | 13.1       | 0.11                        | 14.5                 | 9.75                 |
|                                              | Альмандин          | 5.34               | 3.47       | 0.02                        | 14.93                | 2.86                 |
|                                              | Роговая<br>обманка | 17.7               | 18.8       | 0.32                        | 11.04                | 14.5                 |
|                                              | Лабрадор           | 2.54               | 6.62       | 0.04                        | Не опр.              | 4.91                 |
|                                              | Эпидот             | 16.8               | 15.2       | 0.07                        | 0.78                 | 11.8                 |
|                                              | Салит              | Не опр.            | Не опр.    | 0.3                         | 32.04                | 0.29                 |
|                                              | Доломит            | 0.25               | 0.81       | 18.6                        | 2.09                 | 4.72                 |
|                                              | Прочие             | 21.11              | 14.85      | 3.41                        | 9.31                 | 13.27                |
|                                              | Всего              | 66.33              | 72.85      | 22.87                       | 84.69                | 62.1                 |
|                                              | ИНК                | Везувиан           | 1.4        | 0.6                         | Не опр.              | Не опр.              |
| Максиминералы                                | Кальцит            | 10.4               | 4.05       | 76.3                        | 0.17                 | 20.3                 |
|                                              | Апатит             | 5.12               | 2.9        | 0.21                        | 1.87                 | 2.4                  |
|                                              | Флюорит            | 0.07               | 0.08       | Не опр.                     | Не опр.              | 0.07                 |
|                                              | Всего              | 15.59              | 7.03       | 76.51                       | 2.04                 | 22.77                |
| Сумма учтенных долей масс Са                 |                    | 102.21             | 97.23      | 99.67                       | 99.52                | 98.38                |

Таблица 3.15

**Доли масс Са (%), находящиеся в минералах ортометаморфических пород**

| Категории минералов как концентраторов Са | Минералы        | Гранито-гнейсы | Метариолиты | Метаандезиты | Метабазиты | Ортометаморфиты |
|-------------------------------------------|-----------------|----------------|-------------|--------------|------------|-----------------|
| Миниминералы                              | Олигоклаз       | 30             | 25.76       | 10.9         | 0.81       | 21.1            |
|                                           | Прочие          | 5              | 8.62        | 3.87         | 4.04       | 4.64            |
|                                           | Всего           | 35             | 34.38       | 14.77        | 4.85       | 25.74           |
| Кларкминералы                             | Андезин         | 17.4           | Не опр.     | 16.5         | 11.1       | 15.4            |
|                                           | Актинолит       | Не опр.        | 2.56        | 4.22         | 5.89       | 1.82            |
|                                           | Роговая обманка | 8.04           | 5.86        | 11.6         | 10.8       | 8.9             |
|                                           | Лабрадор        | 13.1           | Не опр.     | 7.26         | 16.2       | 13.5            |
|                                           | Авгит           | 5.85           | 3.58        | 5.52         | 18.5       | 9.23            |
|                                           | Эпидот          | 0.71           | 28.04       | 10.2         | 17.3       | 5.96            |
|                                           | Диопсид         | Не опр.        | Не опр.     | 9.31         | 4.42       | 1.62            |
|                                           | Прочие          | 10.02          | 11.16       | 8.82         | 14.38      | 10.8            |
|                                           | Всего           | 55.12          | 51.2        | 73.43        | 98.59      | 67.23           |
| Максиминералы                             | Кальцит         | 1.88           | 14.39       | 9.47         | 0.55       | 2.04            |
|                                           | Апатит          | 3.03           | 1.96        | 0.48         | 0.24       | 2.19            |
|                                           | Всего           | 4.91           | 16.35       | 9.95         | 0.79       | 4.23            |
| Сумма учтенных долей масс Са              |                 | 95.03          | 101.93      | 98.15        | 104.23     | 97.2            |

Параметаморфические породы по распределению масс Са напоминают осадочные. Главный максиминерал здесь также кальцит (табл. 3.14). Но, судя по полученным данным, он распределен здесь еще менее равномерно, чем в осадочных породах. Как следствие доли массы Са, сконцентрированные в максиминералах, варьируют от 7.04 в парасланцах до 76.51% в карбонатных породах. В ортометаморфических породах (табл. 3.15) роль кальцита и апатита в качестве носителей Са мала, но больше, чем в магматических.

**3.2.3. Обсуждение имеющихся данных**

Среднее содержание Mg и Са не только в осадочных, но и параметаморфических породах не соответствует современным представлениям о формировании этих горных пород только за счет продуктов выветривания гранито-гнейсового слоя. Причины не ясны (Ярошевский, 2006), но очевидно, что, по крайней мере, в континентальной части осадочного слоя преобладают многократно переотложенные продукты выветривания не сохранившихся древнейших ассоциаций горных пород. Судя по химическому составу параметаморфических пород, «избыток» Mg и Са в горных породах осадочного происхождения был заложен на начальных стадиях формирования примитивного осадочного слоя. В более позднее время (начиная с верхнего протерозоя) «избыток» Mg в континентальных осадочных породах сохранялся на достигнутом уровне, «избыток» же Са в виде кальцита биогенного



происхождения продолжал увеличиваться. Реконструкция состава несохранившихся древнейших осадков, вероятно, будет возможна после разработки более подробной и корректной модели земной коры. При этом же условии возможно и уточнение роли конкретных максиминералов как носителей Са и, особенно, Mg. Однако и сейчас очевидно, что резерв потенциально извлекаемых масс Mg велик, Са – огромен.

### **3.2.4. Выводы**

Среднее содержание в верхней части континентальной коры Mg 1.77, Са 3.89%, оно в осадочных породах больше того, которое могло быть заимствовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава. В параметаморфических породах среднее содержание Mg и Са больше того, которое могло быть заимствовано при выветривании современной ассоциации магматических и ортометаморфических пород гранитно-гнейсового слоя.

В верхней части континентальной коры распределение масс Mg следующее, %: 93.13 сконцентрировано в магниевых минералах и только 7.65% – в немагниевых. В максиминералах сконцентрировано 5.85% массы Mg (пеннине 3.22, серпентине 1.05, оливине 0.54, энстатите 0.52, магнезите 0.24, форстерите 0.22, клиногумите 0.03, гумите 0.02, брусите 0.01). Наибольшая концентрация масс Mg в максиминералах имеет место в ультрабазитах и метакарбонатных породах (72.64 и 31.69%, соответственно). Главные максиминералы здесь серпентин, оливин, форстерит и магнезит.

В верхней части континентальной коры 94.59% масс Са сконцентрировано в его собственных минералах и только 3.38% рассеяно как изоморфная примесь в чужих. В максиминералах сконцентрировано 39.21% масс Са, из них 37.5% в кальците. Наибольшая концентрация масс Са в максиминералах имеет место в карбонатных породах осадочного и гранитно-гнейсового слоев: (92.32 и 76.51%, соответственно). Почти все эти доли сконцентрированы в кальците (90.98 и 76.3%, соответственно).

## **3.3. СТРОНЦИЙ И БАРИЙ**

### **3.3.1. Среднее содержание и распределение масс Sr и Ba в верхней части континентальной коры**

Средние содержания Sr и Ba в континентальных горных породах (табл. 3.1) соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2002), исправлено лишь среднее содержание в кремнистых породах. Приводимые здесь средние содержания Sr и Ba в верхней части континентальной коры 0.027 и 0.051% соответственно, близки к минимальным значениям из приводившихся другими исследователями: Sr 0.0266–0.038 и Ba 0.055–0.107% (Rudnick, Gao, 2004). Зависимость средних содержаний Sr и Ba от состава распространенных горных пород (исключая эвапориты, си-

ениты, ультрабазиты) выражена слабо. Средние коэффициенты концентрации Sr 0.4–2.1 и Ba 0.4–1.5. Больше половины масс (Sr 61.53, Ba 64.08%) находится в метаморфических породах гранитно-гнейсового слоя. Коэффициенты концентрации в осадочных породах по отношению к гранитно-гнейсовому: Sr 1.04, Ba 0.76, (КК Al 0.81).

### 3.3.2. Доли масс Sr и Ba, сконцентрированные в максиминералах

Повышенные содержания Sr и Ba характерны для многих минералов, особенно кальциевых и калиевых, но содержания  $Sr \geq 1.5\%$  и  $Ba \geq 1.8$  (минимальные для максиминералов) (Григорьев, 1999) относительно редки. Поэтому максиминералами Sr и Ba в масштабах верхней части континентальной коры являются только бариевые и стронциевые минералы. Они многочисленны, но пока относятся преимущественно к редким. Некоторые стронциевые минералы образуют изоморфные ряды с бариевыми.

Опубликованы результаты более 2700 количественных минералогических анализов горных пород, выполненных методами, допускающими учет стронциевых и бариевых минералов, но эти минералы в большинстве случаев не отмечены. Ниже приведены данные о горных породах, в которых учтены бариевые и стронциевые минералы: количество изученных проб и объекты, где такие минералы были обнаружены.

*Пески и песчаники* (включая более грубообломочные породы). Изученных проб > 1190. В пределах Русской платформы изучены 423 средние пробы, составленные из 5815 образцов (Ронов и др., 1963), среднее содержание барита 0.019%; нижний рифей Южного Урала (Сергеева, 1989), 250 проб, барит – 0.0034%; песчаники маргузорской свиты Таджикистана (Бабкин, 1986) и четвертичные отложения восточной части Балтийского щита (Ильин, Сыромятина, 1972) > 320 проб, барит – около  $3 \cdot 10^{-6}\%$  (учтен качественно).

*Глины и глинистые сланцы*. Изученных проб > 220. Триасовые и верхнепермские глины Приуралья (Саркисян, 1949) 6 проб, барит – 0.0019%, целестин –  $5.5 \cdot 10^{-4}\%$ ; глина Предкарпатского сероносного бассейна (Даценко, 1969), одна проба, барит – 0.28%, целестин – 0.12%; морские суглинки от девонских до эоценовых (Кузнецов, 1992) сотни проб, барит – около  $3 \cdot 10^{-6}\%$  (учтен качественно).

*Карбонатные породы*. Изученных проб 33. Мергель Предкарпатского сероносного бассейна, образец № 428 (Даценко, 1969), барит – 0.39%, целестин – 0.12%. При расчетах результаты изучения этого образца учтены с коэффициентами: барита – 0.13, целестина – 0.5 (с учетом повышенного валового содержания в данном мергеле Ba – 0.28% и Sr – 0.06%).

*Кислые и средние вулканы*. Изученных проб > 54. Липариты, дациты, липарит-дацитовые порфиры Армении (Држбашян, 1965; Мнацаканян, 1965) > 20 проб, барит – 0.0001–0.0063%; трахилипариты Северо-Востока СССР (Ипатьева, Соловьев, 1982), четыре пробы, барит –  $1 \cdot 10^{-5}\%$ .

*Гранитоиды СССР*. Изученных проб 867. Бариевые и стронциевые минералы (включая псиломелан) учли В.В. Ляхович (1967), С.Д. Туровский, Г.Н. Кокорев (1968), М.П. Бартикан (1968), Т.Н. Винокурова и др. (1982).

Таблица 3.16

**Роль максиминералов как носителей Sr в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Sr в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Sr, % | Содержание минералов, % | Доли масс Sr, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Sr, % |
| Барит        | 5                            | 0.0031                  | 0.59            | $4.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.001         | $7.3 \cdot 10^{-4}$                | 0.14            |
| Нордит       | 6.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $7.2 \cdot 10^{-8}$     | < 0.001         | $5.5 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01          |
| Лампрофиллит | 10.1                         | Не опр.                 | Не опр.         | $6.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.003           | $5 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Целестин     | 41.9                         | $7.3 \cdot 10^{-4}$     | 1.05            | $2.9 \cdot 10^{-6}$     | 0.005           | $1.7 \cdot 10^{-4}$                | 0.26            |
| Стронцианит  | 55.4                         | Не опр.                 | Не опр.         | $2.6 \cdot 10^{-7}$     | 0.001           | $2 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Всего        |                              | 0.0038                  | 1.64            | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.009           | 0.0009                             | 0.4             |

Таблица 3.17

**Доли массы Sr (%), сконцентрированные в максиминералах горных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы  |                  |                  |                                 | Вулканыты       |                 |                  |
|----------|-------------------|------------------|------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|          | Пески и песчаники | Глины и сланцы   | Карбонатные      | В целом                         | Кислые          | Средние         | В целом          |
| Барит    | 1.59<br>(0.007)   | 0.54<br>(0.0026) | 0.2<br>(0.0015)  | 0.63<br>(0.0034)                | 0.63<br>(0.003) | 0.39<br>(0.003) | 0.16<br>(0.0013) |
| Целестин | Не опр.           | 1.75<br>(0.001)  | 1.99<br>(0.0018) | 1.35<br>( $8.7 \cdot 10^{-4}$ ) | Не опр.         | Не опр.         | Не опр.          |
| Всего    | 1.59<br>(0.007)   | 2.29<br>(0.0036) | 2.19<br>(0.027)  | 1.98<br>(0.0043)                | 0.63<br>(0.003) | 0.39<br>(0.003) | 0.16<br>(0.0013) |

Примечание. Здесь и далее в табл. в скобках – среднее содержание минералов, %.

**Щелочные породы.** Общее количество изученных проб > 468. Средние содержания для щелочных пород по Р.П. Тихоненковой (1982): лампрофиллит – 0.016, нордит –  $1.1 \cdot 10^{-4}$  % (число проб не известно). В 11 пробах трахитоидных ийолитов Хибинского массива среднее содержание лампрофиллита 0.13% (Зубарев, 1978). В пяти пробах нефелиновых сиенитов Ловозерского массива среднее содержание лампрофиллита 0.1% (Поляков, Кот, 1965; Кузнецова, 1976).

**Метабазиты.** Общее количество проб > 103. Метабазальты Именновской свиты (Уральская сверхглубокая скважина СГ-4), пять проб (Гурбанов и др., 1999), барит установлен качественно (около 0.005%).

При расчете предполагалось, что если минерал в пробе не отмечен, то его там нет. Исключения – псиломелан и голландит (см. раздел 15.1.3).

**Стронций.** Установлено, что в верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 0.4% масс Sr (табл. 3.16), причем практически исключительно за счет целестина и барита осадочного слоя. Роль их максимальна в осадочных породах, а роль барита заметна и в вулканогенных (табл. 3.17). Горные породы гранитно-гнейсового слоя в отношении стронциевых максиминералов изучены недостаточно. Имеются данные о вариациях их содержания в магматических породах, но роль стронциевых

Таблица 3.18

**Доли массы Sr (%), сконцентрированные в максиминералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                       | Гранодиориты                  | Сиениты                      | В целом                         |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Барит        | < 0.001 ( $1 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.001 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | < 0.01 ( $6 \cdot 10^{-6}$ ) | < 0.001 ( $2.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Нордит       | Не опр.                       | Не опр.                       | 0.03 ( $1.1 \cdot 10^{-4}$ ) | < 0.001 ( $4.2 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Лампрофиллит | Не опр.                       | Не опр.                       | 5.05 (0.01)                  | 0.015 ( $3.8 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Целестин     | 0.001 ( $4 \cdot 10^{-7}$ )   | 0.061 ( $6.4 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                      | 0.027 ( $1.7 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Стронцианит  | < 0.001 ( $9 \cdot 10^{-9}$ ) | 0.005 ( $4 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                      | 0.003 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Всего        | 0.001 ( $5.1 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.067 ( $7.8 \cdot 10^{-5}$ ) | 5.08 (0.0101)                | 0.045 ( $5.9 \cdot 10^{-5}$ )   |

Таблица 3.19

**Роль максиминералов как носителей Ba в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание<br>Ba в мине-<br>ралах, % | Осадочный слой                |                    | Гранитно-гнейсовый слой       |                    | Верхняя часть<br>континентальной коры |                    |
|--------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------|
|              |                                      | Содержание<br>минералов,<br>% | Доли масс<br>Ba, % | Содержание<br>минералов,<br>% | Доли масс<br>Ba, % | Содержание<br>минералов,<br>%         | Доли масс<br>Ba, % |
| Лампрофиллит | 5.1                                  | Не опр.                       | Не опр.            | $6.6 \cdot 10^{-6}$           | < 0.01             | $5 \cdot 10^{-7}$                     | < 0.01             |
| Псиломелан   | 11.6                                 | 0.0009                        | 0.26               | $1.3 \cdot 10^{-4}$           | 0.03               | $3.1 \cdot 10^{-4}$                   | 0.07               |
| Голландит    | 11.7                                 | Не опр.                       | Не опр.            | $8.4 \cdot 10^{-4}$           | 0.18               | $6.4 \cdot 10^{-4}$                   | 0.15               |
| Целестин     | 13.8                                 | $7.3 \cdot 10^{-4}$           | 0.25               | $2.9 \cdot 10^{-6}$           | < 0.01             | $1.7 \cdot 10^{-4}$                   | 0.05               |
| Барит        | 50.4                                 | 0.0031                        | 3.81               | $4.5 \cdot 10^{-7}$           | < 0.01             | $7.3 \cdot 10^{-4}$                   | 0.72               |
| Всего        |                                      | 0.0047                        | 4.31               | $9.7 \cdot 10^{-4}$           | 0.21               | 0.0018                                | 0.99               |

Таблица 3.20

**Доли массы Ba (%), сконцентрированные в максиминералах осадочных пород**

| Минералы   | Пески и<br>песчаники | Глины и сланцы | Карбонатные   | Кремнистые   | В целом                      |
|------------|----------------------|----------------|---------------|--------------|------------------------------|
| Псиломелан | 0.16 (0.0005)        | 0.38 (0.0015)  | 0.03 (0.0001) | 3.09 (0.008) | 0.31 (0.0011)                |
| Целестин   | Не опр.              | 0.3 (0.001)    | 0.69 (0.0018) | Не опр.      | 0.29 ( $8.7 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Барит      | 9.54 (0.007)         | 2.85 (0.0026)  | 2.1 (0.0015)  | Не опр.      | 4.18 (0.0034)                |
| Всего      | 9.7 (0.0075)         | 3.53 (0.0051)  | 2.82 (0.0034) | 3.09 (0.008) | 4.78 (0.0054)                |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 3.21

**Доли массы Ba (%), сконцентрированные в максиминералах магматических пород**

| Минералы     | Граниты                       | Гранодиориты                 | Сиениты                      | В целом                       |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Лампрофиллит | Не опр.                       | Не опр.                      | 0.32 (0.01)                  | 0.003 ( $3.8 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Псиломелан   | 0.002 ( $1.2 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.001 ( $7.5 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Целестин     | < 0.001 ( $4 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.02 ( $6.4 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                      | 0.004 ( $1.7 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Барит        | < 0.001 ( $1 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.01 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | < 0.01 ( $6 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.002 ( $2.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Всего        | 0.002 ( $1.3 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.03 ( $7.4 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.32 (0.01)                  | 0.01 ( $6.5 \cdot 10^{-5}$ )  |

Доли масс Ва (%), сконцентрированные в максиминералах параметаморфических пород

| Минералы   | Метапесчаники                | Парасланцы                   | Метакарбонаты                | В целом                      |
|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Псилометан | 0.05 ( $1.7 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.08 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.02 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.08 ( $2.8 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Голландит  | 1.42 (0.0039)                | 0.53 (0.0017)                | 0.23 (0.0006)                | 0.58 (0.0018)                |
| Всего      | 1.47 (0.0041)                | 0.61 (0.002)                 | 0.25 ( $6.5 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.66 (0.0021)                |

максиминералов здесь не существенна. Исключение – сиениты (табл. 3.18). Кроме того, барит обнаружен в метабазах, но среднее содержание его здесь всего  $1 \cdot 10^{-7}$  %.

**Барий.** В верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 0.99% масс Ва (табл. 3.19) в основном за счет барита, псиломелана и целестина осадочного слоя, отчасти – голландита гранитно-гнейсового слоя. В осадочном слое лидируют осадочные породы (табл. 3.20), но барит играет заметную роль и в вулканогенных. Сконцентрированные в барите доли масс Ва, %: в кислых вулканитах – 3.15, в средних – 3.69, вулканитах в целом – 1.6. Роль бариевых максиминералов в магматических породах гранитно-гнейсового слоя незначительная (табл. 3.21). Более существенна роль голландита и отчасти псиломелана в параметаморфических породах (табл. 3.22). Роль барита в метабазах незначительна ( $4 \cdot 10^{-5}$  % массы Ва).

### 3.3.3. Обсуждение полученных данных

Данные о среднем содержании и распределении масс Sr и Ва в совокупности континентальных горных пород получены на основе обширного фактического материала. На данной стадии исследований большую их часть можно считать корректными, уточнения возможны после разработки более совершенной модели верхней части континентальной коры.

Корректность исходных данных о содержании стронциевых и бариевых максиминералов оставляет желать лучшего, поскольку они получены микрообогатительными методами, которыми обычно учитывали лишь частицы крупностью  $> 30\text{--}250$  мкм. Кроме того, для количественных минералогических анализов были выбраны преимущественно пробы наиболее распространенных разновидностей горных пород, т. е. разновидностей с содержанием химических элементов, близким к кларковому. Главные же носители максиминералов любого химического элемента горные породы с повышенным его содержанием (Григорьев, 1999). Таким образом, исходные данные соответствуют преимущественно минимально возможным значениям содержания максиминералов Sr и Ва в горных породах. Исключение – среднее содержание целестина в карбонатных породах, которое, возможно, преувеличено.

Возможность сопоставления полученных данных с результатами определений минеральных балансов Sr и Ва в конкретных пробах горных пород

отсутствует. Эпизодические литературные данные характеризуют такие разновидности магматических пород, которые не содержат стронциевых и бариевых максиминералов.

#### **3.3.4. Выводы**

В верхней части континентальной коры средние содержания Sr 0.027, Ba 0.051%. Больше половины их масс сосредоточено в метаморфических породах гранитно-гнейсового слоя: Sr 61.53, Ba 64.08%. В верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано, %: Sr 0.4 (в целестине 0.26, барите 0.14), Ba 0.99 (барите 0.72, голландите 0.15, псиломе-лане 0.07, целестине 0.05). Приведенные данные – очередное приближение к пониманию истинной ситуации.

## Глава 4

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ БОРА В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

---

Здесь рассмотрены только В и Al. Исходные данные по Ga, In, Tl пока недостаточны для решения поставленных вопросов. Некоторые сведения о Ga и In публиковались раньше (Григорьев, 1999).

#### 4.1. БОР

##### 4.1.1. Среднее содержание и распределение масс В в верхней части континентальной коры

Данные о среднем содержании В в горных породах (табл. 4.1) соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2003). Среднее содержание В в верхней части континентальной коры 0.0034% несколько больше значений, приводившихся в течение последних 40 лет другими исследователями, – 0.00092–0.0028% (Rudnick, Gao, 2004). Главные концентраторы и носители В в осадочном слое глины и глинистые сланцы, в гранитно-гнейсовом – парагнейсы и парасланцы (табл. 4.1). В верхней части континентальной коры В – избыточный элемент. Его среднее содержание в совокупности континентальных осадочных пород (0.0072%) в 3.5 раза больше того, которое могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (0.002%, расчет изоалюминиевым методом).

##### 4.1.2. Доли масс В, сконцентрированные в турмалине и других борных минералах

Турмалин – единственный борный минерал, часто учитываемый при определении содержания акцессорных минералов в горных породах. Первые попытки косвенного определения вероятной роли турмалина как носителя В были основаны на данных о вариациях содержания этого элемента в породообразующих минералах. Г. Хардер (1965) показал, что в большинстве породообразующих минералов содержание В варьирует вблизи среднего для земной коры. Повышенным содержанием характеризуются преимущественно светлые листовые силикаты: серицит, мусковит, парагонит, иллит. Г. Хардер утверждал, что в горных породах это главные носители В. Позже предполагали второстепенную роль борных минералов как носителей В (Иванов, 1994). Затем автором была предпринята попытка определения

Таблица 4.1

**Среднее содержание и распределение масс В и Al в ассоциации  
горных пород верхней части континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород,<br>% | Среднее содержание, % |             | Доли масс, %  |              |
|-------------------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------|---------------|--------------|
|                                           |                   | В                     | Al          | В             | Al           |
| Пески и песчаники                         | 5.11              | 0.0026                | 5.99        | 3.91          | 4.02         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4              | 0.011                 | 8.9         | 33.68         | 12.16        |
| Карбонатные породы                        | 3.85              | 0.0037                | 1.19        | 4.19          | 0.6          |
| Кремнистые породы                         | 0.33              | 0.001                 | 2.48        | 0.1           | 0.11         |
| Эвапориты                                 | 0.26              | 0.0038                | 0.04        | 0.29          | < 0.01       |
| Кислые вулканы                            | 0.44              | 0.0029                | 6.99        | 0.38          | 0.4          |
| Средние вулканы                           | 1.13              | 0.0038                | 8.83        | 1.26          | 1.31         |
| Основные вулканы                          | 2.11              | 0.0009                | 8.66        | 0.56          | 2.4          |
| Граниты                                   | 8.21              | 0.0013                | 7.36        | 3.14          | 7.94         |
| Гранодиориты                              | 3.38              | 0.0012                | 8.6         | 1.19          | 3.82         |
| Базиты                                    | 1.5               | 0.0005                | 7.94        | 0.22          | 1.57         |
| Сиениты                                   | 0.05              | 0.0009                | 9.84        | 0.01          | 0.07         |
| Ультрабазиты                              | 0.05              | 0.0003                | 3.03        | < 0.01        | 0.02         |
| Метапесчаники                             | 2.92              | 0.0017                | 5.33        | 1.46          | 2.05         |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56             | 0.0036                | 8.13        | 32.39         | 32.65        |
| Метаморфизованные карбонатные породы      | 1.13              | 0.0017                | 0.96        | 0.565         | 0.14         |
| Железистые породы                         | 0.38              | 0.007                 | 3.02        | 0.78          | 0.15         |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21             | 0.002                 | 8.37        | 13.66         | 25.53        |
| Метариолиты                               | 0.66              | 0.0024                | 7.28        | 0.47          | 0.63         |
| Метаандезиты                              | 1.03              | 0.0016                | 8.35        | 0.485         | 1.13         |
| Метабазиты                                | 3.29              | 0.0013                | 7.48        | 1.26          | 3.23         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>        | <b>0.0034</b>         | <b>7.61</b> | <b>100.00</b> | <b>99.93</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95             | 0.0072                | 6.44        | 42.17         | 16.89        |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68              | 0.002                 | 8.51        | 2.2           | 4.11         |
| <b>Осадочный слой</b>                     | <b>23.63</b>      | <b>0.0064</b>         | <b>6.77</b> | <b>44.37</b>  | <b>21.00</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19             | 0.0012                | 7.74        | 4.57          | 13.42        |
| Параметаморфические породы                | 34.99             | 0.0034                | 7.61        | 35.2          | 34.99        |
| Ортометаморфические породы                | 28.19             | 0.0019                | 8.24        | 15.88         | 30.52        |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой</b>            | <b>76.37</b>      | <b>0.0025</b>         | <b>7.87</b> | <b>55.64</b>  | <b>78.93</b> |



Таблица 4.2

**Роль борных минералов как носителей В в верхней части континентальной коры**

| Минералы    | Среднее содержание В в минералах, мас. % | Осадочный слой          |                      | Гранитно-гнейсовый слой |                      | Верхняя часть континентальной коры |                      |
|-------------|------------------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|
|             |                                          | Содержание минералов, % | Доли массы В, отн. % | Содержание минералов, % | Доли массы В, отн. % | Содержание минералов, %            | Доли массы В, отн. % |
| Корнерупин  | 0.89                                     | Не опр.                 | Не опр.              | $7.8 \cdot 10^{-4}$     | 0.28                 | 0.0006                             | 0.16                 |
| Дюмортьерит | 1.5                                      | Не опр.                 | Не опр.              | $1 \cdot 10^{-8}$       | < 0.01               | $7.6 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01               |
| Аксинит     | 1.9                                      | Не опр.                 | Не опр.              | $1.5 \cdot 10^{-5}$     | 0.01                 | $1.1 \cdot 10^{-5}$                | 0.01                 |
| Турмалин    | 3.09                                     | 0.0081                  | 3.91                 | 0.0031                  | 3.83                 | 0.0043                             | 3.91                 |
| Всего       |                                          | 0.0081                  | 3.91                 | 0.0039                  | 4.12                 | 0.0049                             | 4.08                 |

среднего содержания турмалина в верхней части континентальной коры на основе литературных данных о содержании этого минерала в горных породах. Отметим наиболее значительные исходные данные. Среднее содержание турмалина в песках Русской платформы по А.Б. Ронову с коллегами (1963) 0.059%. Среднее содержание турмалина в гранитах СССР при различных комбинациях данных В.В. Ляховича (1967) 0.0012–0.0018%. Расчет на основе подобных данных показал, что среднее содержание турмалина в верхней части земной коры 0.0066% (Григорьев, 1999). Это соответствовало доле массы В, сконцентрированной в турмалине 23%. К сожалению, эти цифры оказались преувеличенными, как показал новый расчет, выполненный с учетом всех доступных материалов. Учтены опубликованные в литературе результаты количественных минералогических анализов > 3500 проб горных пород. Наиболее изучены: пески и песчаники осадочного слоя (> 1164 проб), граниты (> 739 проб), гранодиориты и прочие гранитоиды повышенной основности (459 проб), сиениты (> 539 проб), базиты (> 96 проб), метабазиты (> 84 проб), ультрабазиты (> 76 проб), парагнейсы и прочие парасланцы (> 72 проб). Относительно слабо изучены главные концентраторы В – глины и глинистые сланцы (> 23 проб). Количество изученных проб по каждой из остальных горных пород или неизвестно, или меньше 50. Главные источники исходных данных перечислены в разделе 1.2. Необходимое для расчетов среднее содержание В в борных минералах определено приблизительно по данным, опубликованным в справочниках.

По расчету доли массы В, сконцентрированные в турмалине в осадочном, гранитно-гнейсовом слоях и верхней части континентальной коры, соизмеримы (табл. 4.2), но в осадочном слое роль турмалина сильно варьирует. Она максимальна в кремнистых породах, песках и песчаниках, минимальна – в эвапоритах, карбонатных и вулканогенных породах (табл. 4.3). В гранитно-гнейсовом слое максимальной ролью турмалина характеризуются: граниты, гранодиориты, базиты и гранито-гнейсы. Роль других борных минералов заметна только в гранитоидах и парасланцах. Среднее содержание в гранитах аксинита  $1.4 \cdot 10^{-4}$  %, дюмортьерита  $1 \cdot 10^{-7}$  %, сконцентрированных в них долей масс В, соответственно, 0.2 и < 0.01%. В гранодиоритах установлен аксинит ( $1 \cdot 10^{-7}$  %), доля массы В в нем < 0.01%. В магматических породах в целом среднее содержание аксинита  $8.7 \cdot 10^{-5}$  %, дюмортьерита  $6 \cdot 10^{-8}$  %. Сконцентрированные в этих минералах доли масс В, соответствен-

Таблица 4.3

**Доли масс В, сконцентрированные в турмалине в горных породах континентальной коры**

| Горные породы                                     | Содержание, турмалина, мас. %       | Доли массы В, отн. % |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Пески и песчаники                                 | 0.023                               | 27.3                 |
| Глины и глинистые сланцы                          | 0.0066                              | 1.85                 |
| Карбонатные породы                                | $1.2 \cdot 10^{-4}$                 | 0.1                  |
| Кремнистые породы                                 | 0.012                               | 37.1                 |
| Эвапориты                                         | 0.0001                              | 0.08                 |
| <b>Осадочные породы в целом</b>                   | <b>0.0096</b>                       | <b>4.12</b>          |
| Кислые вулканы                                    | $3 \cdot 10^{-5}$                   | 0.03                 |
| Средние вулканы                                   | $5 \cdot 10^{-5}$                   | 0.04                 |
| Основные вулканы                                  | Не опр.                             | Не опр.              |
| <b>Вулканы осадочного слоя в целом</b>            | <b><math>2 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b>0.03</b>          |
| Граниты                                           | 0.003                               | 7.13                 |
| Гранодиориты                                      | 0.002                               | 5.15                 |
| Базиты                                            | 0.001                               | 6.18                 |
| Сиениты                                           | $1.3 \cdot 10^{-4}$                 | 0.45                 |
| Ультрабазиты                                      | $3 \cdot 10^{-5}$                   | 0.31                 |
| <b>Магматиты гранитно-гнейсового слоя в целом</b> | <b>0.0025</b>                       | <b>6.44</b>          |
| Метапесчаники                                     | 0.0007                              | 1.27                 |
| Парагнейсы и парасланцы                           | 0.0033                              | 2.83                 |
| Метаморфизованные карбонатные породы              | Не опр.                             | Не опр.              |
| Железистые породы                                 | Не опр.                             | Не опр.              |
| <b>Параметаморфические породы в целом</b>         | <b>0.0029</b>                       | <b>2.64</b>          |
| Гранито-гнейсы                                    | 0.004                               | 6.18                 |
| Метариолиты                                       | 0.0022                              | 2.83                 |
| Метаандезиты                                      | $1.7 \cdot 10^{-4}$                 | 0.33                 |
| Метабазиты                                        | 0.0023                              | 5.47                 |
| <b>Ортометаморфические породы в целом</b>         | <b>0.0036</b>                       | <b>5.85</b>          |

но, 0.14 и  $< 0.01\%$ . В парасланцах установлен корнерупин. Его среднее содержание 0.0019%, сконцентрированная доля массы В – 0.47 %. В параметаморфических породах в целом среднее содержание корнерупина 0.0017%, сконцентрированная в нем доля массы В 0.45%.

Параллельно с отмеченными исследованиями публиковались результаты определений минеральных балансов В в конкретных горных породах. Первые три баланса В в гранитах Гарца рассчитал Х. Пиллер (Piller, 1951). Доли масс В, сконцентрированные в турмалине, по его расчетам, 0.1–34%. В дальнейшем были получены данные, достаточные для расчета еще 42 минеральных балансов В в гранитоидах (включая гранитные пегматиты) и вулканических породах (Косалс, Мазуров, 1968; Ежков, Левченко, 1972; Анастасенко, 1983; Антипин и др., 1982; Геохимия мезозойских..., 1984; Зубков, Петров, 1984; Могаровский, 1987; Shearer, Parike, 1986). Борные минералы в большинстве случаев не установлены или не учтены. Судя по имеющимся данным,

Таблица 4.4

**Минеральный баланс В в гранитоидах и риолите**

| Минералы       | А       |         |     | 839/65  |        |     | ДД-4133 |        |     |
|----------------|---------|---------|-----|---------|--------|-----|---------|--------|-----|
|                | 1       | 2       | 3   | 1       | 2      | 3   | 1       | 2      | 3   |
| Кварц          | 18.6    | 0.00084 | 6   | 32      | 0.0008 | 9   | 5.3     | 0.001  | < 1 |
| Турмалин       | 0.03    | 3.53    | 39  | Не обн. | —      | —   | Не обн. | —      | —   |
| Амфибол        | 10.3    | 0.0025  | 10  | Не обн. | —      | —   | Не обн. | —      | —   |
| Бiotит         | 24.4    | 0.0013  | 12  | 4       | 0.0007 | 1   | 0.3     | 0.0014 | < 1 |
| Плагноклазы    | 46.6    | 0.002   | 35  | 28      | 0.0083 | 80  | 2.9     | 0.0018 | < 1 |
| КПШ            | Не обн. | —       | —   | 34      | 0.0009 | 11  | 4.2     | 0.0012 | < 1 |
| Основная масса | Не обн. | —       | —   | Не обн. | —      | —   | 87      | 0.047  | 100 |
| В пробе        | 99.93   | 0.0027  | 102 | 98      | 0.0029 | 101 | 99.7    | 0.041  | 100 |

Примечание. А – гранодиорит каракульского комплекса, Таджикистан (Могаровский, 1987); 839/65 – гранит Биту-Джидинского массива, Западное Прибайкалье (Косалс, Мазуров, 1968); ДД-4133 – риолит из Забайкалья (Антипин и др., 1981). Здесь и в табл. 4.5: 1 – минеральный состав проб, %; 2 – содержание В, %; 3 – доли масс В и их суммы.

Таблица 4.5

**Минеральный баланс В в зонах\* пегматита Тип-Топ, Южная Дакота, США (Shearer, Parike, 1986)**

| Минералы    | OSM     |        |     | PQB     |        |     | PQM-1   |        |     |
|-------------|---------|--------|-----|---------|--------|-----|---------|--------|-----|
|             | 1       | 2      | 3   | 1       | 2      | 3   | 1       | 2      | 3   |
| Кварц       | 61      | 0.0015 | 8   | 19      | 0.0011 | < 1 | 20      | 0.001  | < 1 |
| Монтебразит | 11.5    | 0.0018 | 2   | Не обн. | —      | —   | Не обн. | —      | —   |
| Турмалин    | Не обн. | —      | —   | 4.5     | 3.15   | 95  | 4       | 4.1    | 108 |
| Сподумен    | 16      | 0.065  | 87  | Не обн. | —      | —   | Не обн. | —      | —   |
| Мусковит    | 3       | 0.026  | 6   | 4.5     | 0.01   | < 1 | 14      | 0.003  | < 1 |
| Бiotит      | Не обн. | —      | —   | 8.5     | 0.0024 | < 1 | 4.5     | 0.0048 | < 1 |
| КПШ         | 7       | 0.0015 | 1   | 58      | 0.0022 | 1   | 57      | 0.0022 | 1   |
| В зоне      | 100     | 0.012  | 104 | 100     | 0.15   | 96  | 99.5    | 0.152  | 109 |

\* Зоны: OSM – кварцево-сподумен-монтебразитовая; PQB – пертит-кварцево-биотитовая; PQM-1 – пертит-кварцево-мусковитовая.

главные концентраторы и носители В в интрузивных магматических породах плагноклазы, в вулканогенных – стекло или продукты его раскристаллизации. Турмалин отмечали в гранитоидах с содержанием В 0.001–0.1%, но не всегда (табл. 4.4). В гранитных пегматитах при содержании В около 0.15% в турмалине сконцентрирована практически вся его масса (табл. 4.5).

**4.1.3. Обсуждение полученных данных**

Среднее содержание и распределение массы В в ассоциации горных пород рассчитаны с учетом обширного фактического материала (Григорьев, 2001) и для данной стадии исследования достаточно корректны.

Исходные данные о вариациях содержания борных минералов в горных породах получены микрообогатительными методами, учитывающими только частицы крупностью 30–250 мкм или > 30–50 мкм. Таким образом, исходные данные соответствуют не истинным, а минимально возможным значениям содержания турмалина и других борных минералов в горных породах. Соответственно и приведенные выше значения долей масс В, сконцентрированных в борных минералах, минимально возможные.

Установлено, что максимальной концентрацией массы В в турмалине характеризуются кремнистые породы, пески и песчаники, но кремнистые породы изучены недостаточно, и эта часть данных нуждается в проверке с использованием нового фактического материала.

Согласно полученным данным, среднее содержание турмалина в осадочных породах в 4 раза больше того, которое могло быть унаследовано при выветривании горных пород гранитно-гнейсового слоя. Таким образом, часть «избыточной» массы В в осадочных породах сконцентрирована в турмалине. Вероятная причина этого – преобладание в осадочных породах турмалина экзогенного генезиса как аутигенного, так и реликтового, унаследованного от не сохранившихся древнейших осадочных пород. Для уточнения полученных данных нужны дополнительные определения содержания борных минералов в континентальных горных породах.

#### **4.1.4. Выводы**

Среднее содержание В в верхней части континентальной коры 0.0034 %. Максимальным средним содержанием В характеризуются осадочные и парапетаморфические породы, в которых находится 77.37% массы этого элемента. В верхней части континентальной коры в борных минералах сконцентрировано 4.08% масс В, в том числе в турмалине 3.91, корнерупине 0.16, аксините 0.01%. Эти цифры минимально возможные. Максимальная концентрация В в турмалине установлена в песках, песчаниках (27.3% массы) и кремнистых породах (37.1% массы), но последняя цифра требует проверки и уточнения с привлечением результатов дополнительных количественных минералогических анализов.

### **4.2. АЛЮМИНИЙ**

#### **4.2.1. Среднее содержание и распределение масс Al в верхней части континентальной коры**

Среднее содержание Al в большинстве горных пород (см. табл. 4.1) приведено по А.Б. Ронову с соавторами (1990) с небольшими поправками. В гранитах и гранодиоритах оно дано по А.А. Беусу (1981), а гранито-гнейсах, метаандезитах, осадочном и гранитно-гнейсовом слоях – по (Григорьев, 2003, б). Приведенным данным соответствует среднее содержание Al в верхней части континентальной коры 7.61%. Эта цифра не выходит за пределы значений 7.5–8.52%, публиковавшихся другими исследователями

(Rudnick, Gao, 2004). Среднее содержание Al повышено в сиенитах, глинистых породах, средних вулканитах, гранодиоритах, метаандезитах, но средние коэффициенты концентрации Al здесь минимальные – 1.1–1.29. В осадочных и параметаморфических породах сосредоточено 51.88% массы Al (см. табл. 4.1).

#### **4.2.2. Вариации степени концентрации масс Al в осадочных и параметаморфических породах**

Основа расчета – частота встреч проб с разным содержанием Al. Используются преимущественно опубликованные результаты изучения значительных массивов горных пород. Результаты специальных исследований участков горных пород с повышенным содержанием Al при решении данного вопроса, как правило, не учитывались. В выборки включены преимущественно данные анализов конкретных проб и средние по 2–5 анализам, редко – средние по 6–30 анализам одинаковых горных пород. Ниже перечислены главные источники исходных данных: по осадочным породам (Анфимов, 1997; Афанасьева, 1979, 1983; Глухан, Серых, 2000; Ерофеев, Цеховский, 1983; Кузнецов, 1973; Малиновский, 2005; Маслов и др., 2004; Морозов и др., 1983, 1996; Парначев, 1987; Пачаджанов, 1981; Петров, 1982; Розенбуш, 1934; Тейлор, Мак-Леннан, 1988; Шутов, 1975; Condie et al., 2001; Di Leo, 2002; Gallet et al., 1998); по параметаморфическим породам (Белькова и др., 1972; Буданова, 1991; Варганова и др., 1971; Геология..., 1978; Геохимия древних..., 2002; Головенко, 1976; Горбачев, 1981; Дмитриева и др., 2006; Кисин, 1991; Макрыгина, 1981; Метаморфические..., 1990; Ожогин, 1971; Парначев, 1987; Петров, 1982; Равич, Каменев, 1972; Розенбуш, 1934; Сафронов, 2005; Созинов и др., 1988; Тейлор, Мак-Леннан, 1988; Тимонина, 1980; Шашкина, 1973; Шванов, 1983; Condie et al., 1991; Yang et al., 1998).

*Песчаные породы* (пески, песчаники, алевролиты; сюда же условно включены конгломераты и гравеллиты), учтены 1639 анализов. Среднее содержание Al в выборке 5.35%, что несколько меньше среднего для таких пород (5.99%). Установлено, что повышенным и высоким содержанием Al (> 10.63%) характеризуется только 0.79% массы песчаных пород (табл. 4.6), в которых сконцентрировано 2% всей массы Al, имеющейся в песчаных породах в целом.

*Глинистые породы* (глины, глинистые сланцы, аргиллиты, аллиты, лесс), учтены 1506 анализов. Среднее содержание Al в выборке 8.84%, что близко к среднему для глинистых пород (8.9%). Установлено, что повышенным и высоким содержанием Al характеризуется, соответственно, 11.16 и 3.05% массы глинистых пород (табл. 4.7). В таких разновидностях сконцентрировано, соответственно, 15.61 и 6.57% всей массы Al, имеющейся в глинистых породах.

*Карбонатные породы* (известняки, мергели, доломиты) характеризуются преимущественно низким содержанием Al. Роль их как носителей этого элемента мала. Актуально определение суммарной доли масс разновидностей этих пород с отношением содержаний  $Al_2O_3/SiO_2 > 0.87$ . Теоретиче-

Таблица 4.6

**Соотношение масс осадочных пород с разным содержанием Al  
и распределение Al в этих породах**

| Содержание Al, %         | Соотношение масс пород, % |           | Распределение масс Al, % |           |
|--------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
|                          | Песчаные                  | Глинистые | Песчаные                 | Глинистые |
| Низкое (< 5.3)           | 47.11                     | 7.44      | 26.5                     | 3.26      |
| Преобладающее (5.3–10.6) | 52.1                      | 78.35     | 71.5                     | 74.56     |
| Повышенное (10.6–13.22)  | 0.55                      | 9.23      | 1.22                     | 12.44     |
| Повышенное (13.22–15.87) | 0.12                      | 1.93      | 0.33                     | 3.17      |
| Высокое (15.87–18.51)    | Не опр.                   | 1.19      | Не опр.                  | 2.33      |
| Высокое (18.51–21.16)    | 0.12                      | 1.59      | 0.45                     | 3.58      |
| Высокое (> 21.16)        | Не опр.                   | 0.27      | Не опр.                  | 0.66      |
| В горной породе          | 100                       | 100       | 100                      | 100       |

Таблица 4.7

**Соотношение масс метаморфических пород с разным содержанием Al  
и распределение масс Al в этих породах**

| Содержание Al, %         | Соотношение масс пород, %    |                           | Распределение масс Al, % |            |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|------------|
|                          | Метапесчаники<br>(792 пробы) | Парасланцы<br>(1796 проб) | Метапесчаники            | Парасланцы |
| Низкое (< 5.3)           | 47.64 (2.62)*                | 5.51 (0.49)*              | 24.03                    | 2.22       |
| Преобладающее (5.3–10.6) | 51.97 (2.49)                 | 81.07 (5.01)              | 75                       | 75.59      |
| Повышенное (10.6–13.22)  | 0.26 (не обн.)               | 6.68 (1.45)               | 0.63                     | 9.22       |
| Повышенное (13.22–15.87) | 0.13 (не обн.)               | 2.95 (0.95)               | 0.34                     | 4.97       |
| Высокое (15.87–18.51)    | –                            | 2.56 (1.41)               | –                        | 5.09       |
| Высокое (18.51–21.16)    | –                            | 0.95 (0.62)               | –                        | 2.16       |
| Высокое (> 21.16)        | –                            | 0.28 (0.16)               | –                        | 0.75       |
| В горной породе          | 100 (5.11)                   | 100 (10.09)               | 100                      | 100        |

\* В скобках доли масс метапесчаников и парасланцев, в которых есть алюминиевые максиминералы (данные качественных и количественных минералогических анализов).

ски в них обязательно присутствие алюминиевых гидроксидов или корунда. Автором собраны результаты 637 анализов карбонатных пород от докембрийских до современных. Отношение содержаний  $Al_2O_3/SiO_2 > 0.87$  оказалось в 8 из 30 проб карбонатных пород, отобранных в районах бокситовых месторождений Северного и Южного Урала (Шарова, Гладковский, 1958; Гуткин, 1964). Отношением содержаний  $Al_2O_3/SiO_2 > 0.87$  характеризуется 0.8% массы карбонатных пород. В них сосредоточен 1% имеющейся в карбонатных породах массы Al.

*Метапесчаники* (включая метаконгломераты, метагравеллиты, кварцито-песчаники, метаалевролиты и кварциты). В выборке 792 анализа. Среднее содержание Al в выборке 5.16% при среднем для метапесчаников 5.33%. Повышенным содержанием Al характеризуется 0.39% масс этих пород (см. табл. 4.7), в которых сконцентрировано 0.97% масс Al в метапесчаниках.

*Парасланцы* (включая парагнейсы, кальцифиры с содержанием карбонатов <50% и кристаллические сланцы с признаками осадочного происхождения). В выборке 1796 анализов. Среднее содержание Al в выборке 8.64%, при среднем для таких пород 8.13%. Повышенным и высоким содержанием Al характеризуются 9.63 и 3.79% массы парасланцев, в которых сконцентрировано, соответственно, 14.16 и 8% всей массы Al, имеющейся в парасланцах (см. табл. 4.7).

*Метакарбонатные породы* (мраморы и кальцифиры с преобладанием карбонатов). В выборке 401 проба, в том числе 330 проб с содержанием Al < 2.65%. Отношение содержаний  $Al_2O_3/SiO_2 > 0.87$  установлено в 33 пробах. Это наиболее чистые кальцитовые мраморы, а также брусит-кальцитовые мраморы и мраморизованные доломиты.

#### 4.2.3. Среднее содержание алюминиевых максиминералов в осадочных породах и их роль как носителей Al

В литературе относительно много данных о вариациях содержания ставролита, дистена, силлиманита и шпинели в осадочных породах, поэтому здесь (табл. 4.8) приняты их средние содержания, определенные раньше (Григорьев, 2003а). Данные о содержании алюминиевых гидроксидов и корунда в горных породах немногочисленные и получены в основном при изучении месторождений бокситов. Их среднее содержание в осадочных породах рассчитано вновь с учетом валового содержания Al в исследованных пробах.

Массы **песчаных пород**, содержащих алюминиевые гидроксиды и корунд, значительны. Пример – меловые «бокситоносные» песчаники Туру-

Таблица 4.8

#### Среднее содержание алюминиевых максиминералов в осадочных породах и их роль как носителей Al

| Минералы   | Содержание Al в минералах, % | Породы              |        |           |        |             |         |                |        |
|------------|------------------------------|---------------------|--------|-----------|--------|-------------|---------|----------------|--------|
|            |                              | Песчанистые         |        | Глинистые |        | Карбонатные |         | Породы в целом |        |
|            |                              | 1                   | 2      | 1         | 2      | 1           | 2       | 1              | 2      |
| Ставролит  | 27.8                         | 0.007               | 0.03   | 0.01      | 0.05   | Не опр.     | Не опр. | 0.0074         | 0.03   |
| Дистен     | 32.4                         | 0.002               | 0.01   | 0.004     | 0.01   | Не опр.     | Не опр. | 0.0033         | 0.02   |
| Силлиманит | 32.73                        | 0.024               | 0.13   | 0.0033    | 0.1    | Не опр.     | Не опр. | 0.0082         | 0.04   |
| Гиббсит    | 34.4                         | 0.017               | 0.1    | 0.39      | 1.51   | 0.012       | 0.35    | 0.21           | 1.12   |
| Шпинель    | 38                           | 0.0026              | 0.02   | 0.0004    | < 0.01 | Не опр.     | Не опр. | 0.0009         | < 0.01 |
| Бемит      | 44.64                        | 0.0074              | 0.06   | 0.17      | 0.85   | 0.0051      | 0.19    | 0.092          | 0.64   |
| Диаспор    | 45                           | 0.0021              | 0.02   | 0.049     | 0.25   | 0.0016      | 0.06    | 0.026          | 0.18   |
| Корунд     | 52.9                         | $1.3 \cdot 10^{-4}$ | < 0.01 | 0.003     | 0.02   | 0.0001      | < 0.01  | 0.0016         | 0.01   |
| Сумма      |                              | 0.06223             | 0.37   | 0.6297    | 2.79   | 0.0188      | 0.6     | 0.3494         | 2.04   |

Примечание. Здесь и в табл. 4.10: 1 – содержание максиминералов, %, 2 – сконцентрированные в максиминералах доли масс Al, %.

Таблица 4.9

**Зависимость среднего содержания алюминиевых максиминералов (%)  
от валового содержания Al в глинистых породах и парасланцах**

| Содержание Al     | Глинистые породы |                 | Парасланцы |                  |                 |                      |                  |                    |
|-------------------|------------------|-----------------|------------|------------------|-----------------|----------------------|------------------|--------------------|
|                   | n*               | Гиббсит         | n*         | Ставролит        | Дистен          | Силлиманит           | Шпинель          | Корунд             |
| < 5.3             | 0                | 0 (0)?          | 9          | 0                | 0               | 0.06<br>( $< 0.01$ ) | 0.33<br>(0.018)  | 0.05<br>(0.0027)   |
| 5.3–10.6          | 4                | 0 (0)           | 117        | 0.073<br>(0.059) | 0.01<br>(0.008) | 0.18<br>(0.15)       | 0.016<br>(0.013) | 0.006<br>(0.0049)  |
| 10.6–13.22        | 6                | 0.5<br>(0.046)  | 51         | 0.32<br>(0.021)  | 0.11<br>(0.007) | 0.74<br>(0.05)       | 0.063<br>(0.004) | 0.005<br>(0.0003)  |
| 13.22–15.87       | 3                | 0.7<br>(0.014)  | 11         | 0.56<br>(0.017)  | 0               | 2.53<br>(0.08)       | 0.52<br>(0.016)  | 0.019<br>(0.0006)  |
| 15.87–18.51       | 8                | 8.4<br>(0.1)    | 12         | 0.93<br>(0.024)  | 0               | 9.73<br>(0.25)       | 0.18<br>(0.005)  | 0.051<br>(0.0013)  |
| 18.51–21.16       | 11               | 11.4<br>(0.18)  | 1          | 1.6<br>(0.015)** | 0.47<br>(0.005) | 27<br>(0.26)**       | 0.8<br>(0.008)** | 0.12<br>(0.0011)** |
| > 21.16           | 4                | 17<br>(0.046)   | 2          | 2.8<br>(0.008)** | 0               | 65<br>(0.18)**       | 1.5<br>(0.004)** | 0.26<br>(0.0007)** |
| В породах в целом | 36               | 0.39<br>(0.386) | 203        | 0.14<br>(0.144)  | 0.02<br>(0.02)  | 0.97<br>(0.97)       | 0.068<br>(0.068) | 0.012<br>(0.0116)  |

Примечание. В скобках – доли масс Al, сконцентрированные в максиминералах (% от массы Al в данной горной породе); \*n – количество исследованных проб; \*\* – значения, полученные экстраполяцией.

ханского района Красноярского края, площадь распространения которых 200×800 км (Ван, 1977), но данные о вариациях содержания гиббсита, бемита, диаспора в подобных породах автору не известны, определений содержания корунда мало, поэтому расчет (табл. 4.8) проведен на основе зависимости содержания этих минералов от валового содержания Al. При этом предполагалось, что закономерности их распределения аналогичны установленным для глинистых пород.

Есть две главные крайние разновидности **глинистых пород** с повышенным и высоким содержанием Al: существенно каолиновые и не содержащие каолиновых минералов. Алюминиевые гидроксиды и корунд установлены в первых при содержании Al > 17.7%, во вторых – при содержании Al > 12%. Достаточно изучен только гиббсит. Его содержание определено в пробах глин, суглинков, аргиллитов и аллитов из месторождений бокситов, огнеупорных глин и проявлений досонитовой минерализации (Бетелев, 1960; Гладковский и др., 1975; Гончаров, 1952; Гуткин, 1975; Гуткин и др., 1969, 1976; Ситникова, 1975; Ушатинский, Боровский, 1977; Черкасов и др., 1977). На основе этих данных вычислено среднее содержание гиббсита в глинистых породах при разном валовом содержании Al (табл. 4.9). Среднее содержание бемита, диаспора, корунда в глинистых породах определено в предположении о том, что отношения содержаний их и гиббсита здесь такие же, как в бокситах.

**Карбонатные породы.** По данным К.Ф. Терентьевой и Н.С. Ильиной (1942), диаспор, гиббсит (гидраргиллит) и аморфное вещество с содержа-



**Среднее содержание алюминиевых максиминералов в параметаморфических породах и доли масс Al (%), сконцентрированные в этих максиминералах**

| Минералы   | Содержание Al в минералах | Метапесчаники |         | Парасланцы |      | Метакарбонатные |         | Породы в целом |      |
|------------|---------------------------|---------------|---------|------------|------|-----------------|---------|----------------|------|
|            |                           | 1             | 2       | 1          | 2    | 1               | 2       | 1              | 2    |
| Ставролит  | 27.8                      | 0.08          | 0.04    | 0.14       | 0.48 | Не опр.         | Не опр. | 0.13           | 0.47 |
| Топаз      | 29.3                      | Не опр.       | Не опр. | 0.0015     | 0.01 | 0.0009          | 0.03    | 0.0033         | 0.01 |
| Дистен     | 32.4                      | 0.003         | 0.02    | 0.02       | 0.08 | Не опр.         | Не опр. | 0.018          | 0.08 |
| Андалузит  | 32.4                      | 0.05          | 0.3     | 0.2        | 0.8  | Не опр.         | Не опр. | 0.18           | 0.77 |
| Силлиманит | 32.73                     | 0.23          | 1.41    | 0.97       | 3.91 | Не опр.         | Не опр. | 0.87           | 3.74 |
| Сапфирин   | 33                        | 0.003         | 0.02    | 0.007      | 0.03 | Не опр.         | Не опр. | 0.0064         | 0.03 |
| Шпинель    | 38                        | 0.03          | 0.21    | 0.068      | 0.32 | 0.04            | 1.58    | 0.062          | 0.31 |
| Диаспор    | 45                        | Не опр.       | Не опр. | 0.16       | 0.89 | 0.009           | 0.42    | 0.14           | 0.83 |
| Корунд     | 52.9                      | Не опр.       | Не опр. | 0.012      | 0.08 | 0.01            | 0.55    | 0.01           | 0.07 |
| Сумма      |                           | 0.396         | 2       | 1.5785     | 6.6  | 0.0599          | 2.58    | 1.4197         | 6.31 |

ем  $Al_2O_3$  78.9% первыми обнаружили в известняках Хорватии Тучан и Кришпатич в начале XX в. Они же установили широкое распространение кристалликов диаспора и бемита во всех разновидностях силурийских и девонских известняков в районе бокситового месторождения Красная Шапочка на Северном Урале. В подобных известняках Е.С. Гуткин (1964) обнаружил алюминиевые гидроксиды и корунд. Г.Н. Черкасов с коллегами (1977) кратко охарактеризовали содержащие гиббсит «суглинки», состоящие, судя по химическим анализам, на 60–95% из доломита. Но данные о вариациях содержания алюминиевых гидроксидов и корунда в карбонатных породах автору не известны. А.К. Шарова и А.К. Гладковский (1958) установили, что в некоторых пробах известняков, взятых вблизи уральских бокситовых месторождений, Al преобладает над Si. Пять проб по химическому составу близки к широко распространенным карбонатным породам ( $Al_2O_3$  0.1–6.11,  $SiO_2$  0–2.68%). Весь Si и часть Al этих проб пересчитаны на каолинит, остаток Al отнесен за счет алюминиевых гидроксидов и корунда. Результаты пересчитаны на всю выборку. Установлено, что в алюминиевых гидроксидов и корунде сконцентрировано 0.6% массы Al, имеющейся в карбонатных породах (см. табл. 4.8). Соотношение масс этих минералов принято таким же, как в глинистых породах.

#### 4.2.4. О возможной роли досонита (давсонита) как носителя Al в осадочных породах

Перспективный в технологическом отношении досонит не является алюминиевым максиминералом. Он установлен в песчаных и глинистых породах с содержанием Al > 6.03% (Туркин, Выродова, 1977), в том числе в угленосных, нефтеносных и соленосных. Часто ассоциирует с алюминиевыми гидроксидов. Мощность пластов, содержащих досонит, местами боль-

ше 100 м (Ваухите..., 1967). В Кузнецком Алатау в разрезе терригенных пород балахонской серии суммарная мощность пластов, содержащих досонит, 900 м. Содержание досонита в тонких прослоях достигает 40% (Волкова, Рекшинская, 1975). Достаточно подробно охарактеризованы только образцы осадочных пород Припятской впадины. Здесь содержание досонита 39.6–87.6% при валовом содержании Al в образцах 12.93–19.59% (Дмитриев и др., 1975). Возможное среднее содержание досонита в песчаных и глинистых породах (0.001%) определено приблизительно по этим результатам с учетом общего количества известных автору результатов количественных минералогических анализов проб осадочных пород. При этом предполагалось, что если досонит не упомянут, то в данной пробе его нет. По расчету, в песчаных и глинистых породах доли масс Al, сконцентрированные в досоните,  $< 0.01\%$ .

#### **4.2.5. Среднее содержание алюминиевых максиминералов в параметаморфических породах и их роль как носителей Al**

**Метапесчаники и парасланцы.** По данным качественных и количественных минералогических анализов, наличием алюминиевых максиминералов характеризуется 5.11% проб метапесчаников и 10.03% проб парасланцев. Первоначально были рассчитаны средние арифметические величины содержания этих минералов, за исключением диаспора (Григорьев, 2002, б), но в некоторых публикациях (Байраков и др., 1966; Виноградов, 1972; Горощенко, 1971) есть данные о содержании в изученных пробах этих минералов и Al. В других работах (Макрыгина, 1981; Тимонина, 1980; Равич и др., 1965; Равич, Соловьев, 1966; Равич, Каменев, 1972; Moore, 1949; Scotford, 1956) есть результаты количественных минералогических анализов, позволяющие приблизительно определить валовое содержание Al в изученных пробах. Таких данных достаточно для ставролита, дистена, силлиманита, шпинели и корунда. Это дало возможность нового более корректного расчета их среднего содержания с учетом валового содержания Al в исследованных пробах. Расчет для парасланцев приведен в табл. 4.9. Данные по топазу, андалузиту, сапфиру здесь приняты соответственно прежним (Григорьев, 2007, б). Диаспор отмечен в основном в продуктах низкотемпературного метаморфизма глинистых сланцев и близких к ним осадочных пород. Имеющиеся данные, основанные на результатах 311 количественных минералогических анализов, разделены на 3 группы. При среднем валовом содержании Al 18.87, 19.89 и 26.36% среднее содержание диаспора составляет соответственно 5, 26 и 45% (Ушатинский, Боровский, 1978), но эти данные представляют лишь небольшой фрагмент континентальной коры, поэтому при расчете среднего арифметического содержания диаспора в парасланцах каждая из отмеченных групп приравнивалась к одному анализу. Расчет по всем отмеченным выше данным показал, что в метапесчаниках и парасланцах роль силлиманита как носителя Al больше суммарной роли остальных максиминералов (см. табл. 4.10).

**Метакарбонатные породы.** В этих породах относительно широко распространена шпинель, встречаются корунд, диаспор и топаз. Среднее со-

держание шпинели рассчитано по результатам количественных минералогических анализов (Карбонатные породы..., 1975; Равич, Соловьев, 1966; Равич, Каменев, 1972; Салье и др., 1966) с учетом общего количества анализов, выполненных методами, позволявшими учесть этот минерал. По расчету, среднее содержание шпинели в метакарбонатных породах 0.04%, в ней сконцентрировано 1.58% всей имеющейся здесь массы Al. По остальным минералам количественных данных мало или нет. Основа расчета их среднего содержания – химический состав метакарбонатных пород. Разновидностями с отношением содержаний  $Al_2O_3/SiO_2 > 0.87$  представлено 8.2% массы этих пород, весь Si и часть Al в них пересчитаны на мусковит (наиболее богатый Al кларкминерал). Остаток Al отнесен за счет алюминиевых максиминералов. Результаты пересчитаны на всю массу метакарбонатных пород. Установлено, что суммарная доля массы Al, сконцентрированная в максиминералах, составляет 2.58%. За вычетом шпинели остается 1% массы Al. Эта величина условно разделена между корундом, диаспором и топазом соответственно частоте их упоминания в описаниях метакарбонатных пород. Таким образом, роль шпинели как носителя Al здесь больше суммарной роли остальных алюминиевых максиминералов (см. табл. 4.10).

#### **4.2.6. Роль алюминиевых максиминералов как носителей Al в магматических и ортометаморфических породах**

**Вулканогенные породы осадочного слоя** изучены недостаточно. Среднее содержание корунда, досонита и топаза низкое (Григорьев, 2007). В кислых вулканитах суммарная доля массы Al, сконцентрированная в этих минералах, 0.01%, в остальных вулканитах она еще меньше. Диаспор установлен, но вариации его содержания неизвестны (Котова, 1976). Наиболее изучены **магматические породы гранитно-гнейсового слоя**. При расчете учтено количественных минералогических анализов: в гранитах 715, в гранодиоритах 544, в базитах 103. Определения содержания алюминиевых максиминералов в щелочных и ультраосновных породах автору не известны. Публикации, где есть данные о содержании алюминиевых максиминералов в магматических породах (Бартияян, 1968; Бельков, 1979; Вигорова, Покровский, 1973; Ляхович, 1967; Недашковский, 1982; Соболев, 1968; Туровский, Кокарев, 1968; Чернышов, Плаксенко, 1982). Средние суммарные доли масс Al, сконцентрированные в максиминералах, варьируют от  $9 \cdot 10^{-5} \%$  в базитах до 0.002% – в гранитах. В магматических породах в целом в максиминералах сконцентрировано 0.001% массы Al, в том числе по  $3 \cdot 10^{-4} \%$  в дистене, силлиманите и корунде,  $2 \cdot 10^{-4}$  – ставролите,  $1 \cdot 10^{-4}$  – топазе,  $5 \cdot 10^{-5}$  – андалузите,  $2 \cdot 10^{-5}$  – шпинели. В расчетах, относящихся к **ортометаморфическим породам**, учтено количественных минералогических анализов: в гранитогнейсах 302, в метариолитах 55, метаандезитах 13, метабазитах 211. Публикации, где есть данные о содержании алюминиевых максиминералов в ортометаморфических породах (Арутюнов, 1971; Бельков и др., 1988; Гурбанов и др., 1999; Ляхович, 1966, 1967; Носырев и др., 1986; Равич, Каменев, 1972;

Fisher, 1971; Kovisars, 1971). Средние суммарные доли масс Al, сконцентрированные в максиминералах, варьируют от 0.007% в метариолитах до 0.44 в гранито-гнейсах. В ортометаморфических породах в целом в максиминералах сконцентрировано 0.38% массы Al, в том числе в дистене 0.22, силлиманите 0.11, ставролите 0.05%. Роль остальных максиминералов незначительная.

#### 4.2.7. Среднее содержание алюминиевых максиминералов и средний минеральный баланс Al в верхней части континентальной коры

Расчет среднего минерального баланса Al (Григорьев, 1999) выполнен на основе первых подробных данных о среднем минеральном составе верхней части континентальной коры. Эти данные (учтено 90 минералов и других компонентов) были подробнее литературных (учтено 9–20 компонентов), но не противоречили последним (табл. 4.11). Сейчас получены новые, еще более подробные и корректные, данные (см. главу 1). По ним рассчитан средний минеральный состав верхней части континентальной коры. Установлено, что при первом расчете среднее содержание мусковита преувеличено, а биотита – преуменьшено (см. табл. 4.11). Результат – неправильное определение интервала нехарактерной концентрации Al в минералах и ошибочное включение в число алюминиевых максиминералов мусковита, каолинита и анортита. Согласно новому расчету, зависимость роли минералов в качестве носителей Al от содержания Al в минералах близка к мономодальной. Интервал нехарактерной концентрации выражен отчетливо, но 93.04% всей массы Al находится в кларкминералах. В максиминералах сконцентрировано всего 2.66% массы Al, причем роль силлиманита как носителя Al соизмерима с суммарной ролью всех остальных максиминералов (табл. 4.12). Таким образом, полученные данные свидетельствуют в пользу прогнозируемой переориентации алюминиевой промышленности на использование алюминиевых силикатов (Коротеев, Лепезин, 2006).

Таблица 4.11

#### Вариации данных о среднем содержании важнейших алюминиевых минералов-носителей (%) в верхней части континентальной коры

| Минералы    | Мезонорма Канадского щита, по D.M. Shaw et al. (Тейлор, Мак-Леннан, 1988) | Обнаженная часть континентальной коры по H.W. Nesbit, G.M. Yung (Тейлор, Мак-Леннан, 1988) | Верхняя часть континентальной коры |              |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------|
|             |                                                                           |                                                                                            | (Григорьев, 1999)                  | Новые данные |
| Плагиоклазы | 39.3                                                                      | 34.9                                                                                       | 27.41                              | 28.22        |
| КПШ         | 8.6                                                                       | 11.3                                                                                       | 8.3                                | 9.81         |
| Амфиболы    | 0                                                                         | 1.8                                                                                        | 4.6                                | 4.61         |
| Пироксены   | 0                                                                         | 1.2                                                                                        | 2.88                               | 2.45         |
| Биотит      | 11.2                                                                      | 7.6                                                                                        | 5.5                                | 7.49         |
| Мусковит    | 7.6                                                                       | 4.4                                                                                        | 7.2                                | 1.99         |
| Хлориты     | 3.3                                                                       | 1.9                                                                                        | 4.1                                | 3.52         |

Таблица 4.12

## Средний минеральный баланс Al в верхней части континентальной коры, %

| Категории минералов<br>как концентраторов Al | Минералы-носители Al | Содержание<br>минералов | Содержание<br>Al в мине-<br>ралах | Доли массы Al |                        |
|----------------------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------|
|                                              |                      |                         |                                   | В минералах   | В группах<br>минералов |
| Миниминералы<br>0–7.6% Al                    | Роговая обманка      | 3.16                    | 4.98                              | 2.07          | 3.7                    |
|                                              | Прочие               |                         |                                   | 1.63          |                        |
|                                              | Всего                |                         |                                   | 3.7           |                        |
| Кларкминералы<br>7.6–21% Al                  | Стекло основное      | 0.31                    | 7.7                               | 0.31          | 0.31                   |
|                                              | Биотит               | 7.49                    | 9.3                               | 9.15          | 32.99                  |
|                                              | Тюрингит             | 0.12                    | 9.35                              | 0.15          |                        |
|                                              | Шамозит              | 0.55                    | 9.74                              | 0.7           |                        |
|                                              | КППШ*                | 9.81                    | 10                                | 12.89         |                        |
|                                              | Санидин              | 0.061                   | 10.32                             | 0.08          |                        |
|                                              | Альбит               | 4                       | 10.4                              | 5.47          |                        |
|                                              | Клинохлор            | 0.69                    | 10.7                              | 0.97          |                        |
|                                              | Монтмориллонит       | 0.43                    | 10.9                              | 0.62          |                        |
|                                              | Эпидот               | 1.17                    | 11.1                              | 1.71          |                        |
|                                              | Альмандин            | 0.85                    | 11.2                              | 1.25          |                        |
|                                              | Олигоклаз            | 14.31                   | 12.1                              | 22.75         | 38.07                  |
|                                              | Рипидолит            | 1.89                    | 12.9                              | 3.2           |                        |
|                                              | Пренит               | 0.17                    | 13.1                              | 0.29          |                        |
|                                              | Андезин              | 6.56                    | 13.2                              | 11.38         |                        |
|                                              | Бейделлит            | 0.16                    | 13.8                              | 0.29          |                        |
|                                              | Натролит             | 0.088                   | 14.23                             | 0.16          |                        |
|                                              | Лабрадор             | 3.02                    | 15.3                              | 6.07          | 13.98                  |
|                                              | Гидробиотит          | 0.48                    | 15.3                              | 0.97          |                        |
|                                              | Гидромусковит        | 2.51                    | 16.3                              | 5.38          |                        |
|                                              | Фенгит               | 0.039                   | 16.3                              | 0.08          |                        |
|                                              | Цоизит и клиноцоизит | 0.072                   | 16.3                              | 0.15          |                        |
|                                              | Битовнит             | 0.3                     | 16.5                              | 0.65          |                        |
|                                              | Томсонит             | 0.06                    | 17.1                              | 0.13          |                        |
|                                              | Лосонит              | 0.24                    | 17.2                              | 0.54          |                        |
|                                              | Нефелин              | 0.0062                  | 17.5                              | 0.01          |                        |
|                                              | Анортит              | 0.033                   | 19.1                              | 0.08          | 7.69                   |
|                                              | Каолинит             | 0.26                    | 20.4                              | 0.7           |                        |
|                                              | Мусковит             | 1.99                    | 20.5                              | 5.36          |                        |
|                                              | Парагонит            | 0.56                    | 21                                | 1.55          |                        |
|                                              | Всего                |                         |                                   | 93.04         |                        |
| ИНК** 21–27% Al                              |                      | Не опр.                 | Не опр.                           | Не опр.       | Не опр.                |
| Максиминералы<br>> 27% Al                    | Ставролит            | 0.051                   | 27.8                              | 0.19          | 0.19                   |
|                                              | Дистен               | 0.022                   | 32.4                              | 0.09          | 1.7                    |
|                                              | Андалузит            | 0.063                   | 32.4                              | 0.27          |                        |
|                                              | Силлиманит           | 0.31                    | 32.73                             | 1.33          |                        |
|                                              | Сапфирин             | 0.0022                  | 33                                | 0.01          |                        |
|                                              | Гиббсит              | 0.043                   | 34.4                              | 0.19          | 0.19                   |
|                                              | Шпинель              | 0.022                   | 38                                | 0.11          | 0.11                   |
|                                              | Бемит                | 0.018                   | 44.64                             | 0.11          | 0.44                   |
|                                              | Диаспор              | 0.055                   | 45                                | 0.33          |                        |
|                                              | Корунд               | 0.0038                  | 52.9                              | 0.03          | 0.03                   |
|                                              | Всего                |                         |                                   | 2.66          |                        |
| Сумма учтенных долей масс Al                 |                      |                         |                                   | 99.33         | 99.4                   |

\* Калиевые полевые шпаты; \*\* интервал нехарактерной концентрации.

#### 4.2.8. Минеральный баланс Al в парасланцах и парагнейсах, содержащих силлиманит

Этот вопрос представляет повышенный интерес в связи с определением отдаленных перспектив наметившейся переориентации алюминиевой промышленности на использование силлиманита. Судя по имеющимся данным, в содержащих силлиманит парасланцах и продуктах их выветривания, считающихся алюминиевыми рудами, доля массы Al, сконцентрированная в силлиманите, может быть близкой к 50%. Пример – проба из Кяхтинского месторождения с валовым содержанием Al 11.64% (22%  $Al_2O_3$ ). Здесь распределение массы Al, %: силлиманит (фибролит) – 46, глинистые минералы – 27, полевые шпаты – 18, слюды – 9 (Ли, Брадинская, 1959). Благоприятнее минеральный баланс Al в рудах, представленных содержащими силлиманит кварцитами и существенно кварцевыми метапесчаниками. Пример – проба «силлиманитового гнейса» (вероятно, метапесчаника) Соломиевского месторождения с валовым содержанием Al 13.7% (25.9%  $Al_2O_3$ ). Расчет по опубликованным данным о вещественном составе этой пробы (Байраков и др., 1966) показал, что в силлиманите сконцентрировано не меньше 71.63% массы Al (табл. 4.13). Недостаток суммы учтенных долей масс Al – 14.88%, вероятно, обусловлен недооценкой содержания силлиманита и полевых шпатов в хвостах и шламах (количественный минеральный состав пробы определен по результатам ее обогащения гравитационным методом).

Таблица 4.13

**Приблизительный минеральный баланс Al в парасланцах и парагнейсах, содержащих силлиманит. Расчет по данным о минеральном составе проб с учетом валового содержания Al в пробах**

| Минералы                  | Среднее содержание Al в минералах, % | А       |         | Проба 694 |         | Проба 29-66 |         | Б       |         |
|---------------------------|--------------------------------------|---------|---------|-----------|---------|-------------|---------|---------|---------|
|                           |                                      | 1       | 2       | 1         | 2       | 1           | 2       | 1       | 2       |
| Кварц                     | 0                                    | 46.9    | 0       | 34.6      | 0       | 38.5        | 0       | 52.5    | 0       |
| Амфиболы                  | 4.98                                 | 0.2     | 0.15    | Не опр.   | Не опр. | Не опр.     | Не опр. | Не опр. | Не опр. |
| Биотит                    | 9.3                                  | 15.15   | 24.5    | 6.8       | 6.09    | 5.1         | 4.14    | Не опр. | Не опр. |
| КПШ                       | 10                                   | 5.6     | 8.58    | 10.7      | 10.31   | 10.2        | 8.89    | Не опр. | Не опр. |
| Гранаты                   | 11.2                                 | 1.6     | 2.74    | 23        | 24.82   | 32.9        | 32.13   | 16.5    | 13.49   |
| Олигоклаз                 | 12.1                                 | 29.1    | 53.92   | 10.3      | 12.01   | Не опр.     | Не опр. | Не опр. | Не опр. |
| Андезин                   | 13.2                                 | Не опр. | Не опр. | Не опр.   | Не опр. | 5.5         | 6.33    | Не опр. | Не опр. |
| Кордиерит                 | 17.4                                 | Не опр. | Не опр. | 12.1      | 20.28   | Не опр.     | Не опр. | Не опр. | Не опр. |
| Силлиманит                | 32.13                                | 1.2     | 6.02    | 2         | 6.31    | 7           | 19.97   | 29      | 71.63   |
| Сумма                     |                                      | 99.75   | 95.91   | 99.5      | 79.81   | 99.2        | 71.46   | 98      | 71.63   |
| Содержание Al в пробах, % |                                      | 6.53    |         | 10.38     |         | 11.47       |         | 13.7    |         |

Примечание. Здесь и в табл. 4.14: 1 – содержание минералов, %; 2 – сконцентрированные в минералах доли массы Al, %. Расчет по данным: А – Урал, ильменогорский комплекс, среднее из 8 образцов (Левин, 1972); проба 694 – Порьегубско-Умбинская синклиналь, Кольский полуостров (Виноградов, 1972); 29-66 – г. Хеппимораст, Кольский полуостров (Горощенко, 1971); Б – проба содержащего графит (1.9%) метапесчаника («силлиманитового гнейса») Соломиевского алюминиевого месторождения, р. Южный Буг; при расчете учтено фактическое содержание Al в силлиманите – 33.84% (Байраков и др., 1966).

Таблица 4.14

**Приблизительный минеральный баланс Al в слюдистых парасланцах,  
содержащих силлиманит, Manhattan Schist, New York (Scotford, 1956).  
Расчет по минеральному составу проб**

| Минералы                   | Среднее содержание Al в минералах, % | Обр. 57 |         | Обр. 97 |         | Обр. 60 |         | Обр. 59 |         |
|----------------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                            |                                      | 1       | 2       | 1       | 2       | 1       | 2       | 1       | 2       |
| Кварц                      | 0                                    | 42.7    | 0       | 40.9    | 0       | 25      | 0       | Не опр. | Не опр. |
| Бiotит                     | 9.3                                  | 13.1    | 16.85   | 28.3    | 33.83   | 38.8    | 44.99   | 20      | 21.04   |
| КПШ                        | 10                                   | 11.5    | 15.91   | Не опр. | Не опр. | 25.2    | 31.42   | 30      | 33.94   |
| Гранаты                    | 11.2                                 | 2.8     | 4.34    | Не опр. | Не опр. | 1       | 1.4     | 10      | 12.67   |
| Олигоклаз                  | 12.1                                 | 24.9    | 41.67   | 21.4    | 33.28   | 2       | 3.02    | 2       | 2.74    |
| Мусковит                   | 20.5                                 | Не опр. | Не опр. | 3.7     | 9.75    | Не опр. | Не опр. | Не опр. | Не опр. |
| Силлиманит                 | 32.13                                | 4.7     | 21.28   | 5.5     | 23.14   | 4.7     | 19.18   | 8       | 29.62   |
| Сумма                      |                                      | 99.7    | 100     | 99.8    | 100     | 96.7    | 100     | 100     | 100     |
| Содержание Al в пробах*, % |                                      | 7.23    |         | 7.78    |         | 8.02    |         | 8.84    |         |

\* Вычислено по минеральному составу проб.

Горные породы, содержащие силлиманит и < 12% Al, изучены недостаточно. Количественно минеральный состав проб определяли редко, причем только в работе (Левин, 1972) данные минералогического анализа удовлетворительно согласуются с валовым содержанием Al в исследованной пробе (см. табл. 4.13). Вариации содержаний Al в важнейших алюминиевых минералах относительно малы, поэтому приблизительный расчет минерального баланса Al, как правило, возможен по одним только количественным данным о минеральном составе проб. Расчеты показали, что роль силлиманита как носителя Al зависит как от валового содержания этого элемента в горных породах, так и от генезиса последних (см. табл. 4.13, 4.14). Но в целом его роль относительно мала, что придется учитывать как при оценке подобных пород в качестве алюминиевого сырья, так и при разработке рациональных способов их использования. В связи с этим заметим, что алюминиевые максиминералы по содержанию Al мало отличаются от некоторых его кларкминералов. Например, среднее содержание Al в силлиманите всего в 1.6 больше, чем в мусковите или каолините, поэтому для Al выделение максиминералов имеет существенно меньшее практическое значение, чем для абсолютного большинства химических элементов.

#### 4.2.9. Выводы

Среднее содержание Al в верхней части континентальной коры составляет 7.61%. Алюминиевые максиминералы наиболее характерны для осадочных и параметаморфических пород. В этих породах находится 51.88% всей массы Al, имеющейся в верхней части континентальной коры. Алюминиевые максиминералы встречаются преимущественно в уча-

стках с валовым содержанием  $Al > 10.6\%$ . Таким содержанием характеризуются  $14.21\%$  всей массы глинистых пород и  $13.42\%$  всей массы парасланцев. В алюминиевых максиминералах сконцентрировано  $2.66\%$  всей массы  $Al$ , имеющейся в верхней части континентальной коры, в том числе, %: в силлиманите – 1.33, диаспоре – 0.33, андалузите – 0.27, гибbsite – 0.19, ставролите – 0.19, бемите – 0.11, шпинели – 0.11, дистене – 0.09, корунде – 0.03, сапфирине – 0.01.



## Глава 5

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ УГЛЕРОДА

---

#### 5.1. УГЛЕРОД

##### 5.1.1. Среднее содержание и распределение масс С в верхней части континентальной коры

Приведенное здесь (табл. 5.1) среднее содержание С в горных породах верхней части континентальной коры и в ее слоях соответствует опубликованному ранее (Григорьев, 2003). Эти данные преимущественно заимствованы у А.Б. Ронова с соавторами (1990) с незначительными поправками. Среднее содержание С максимально в карбонатных и метакарбонатных породах. Следующее место в качестве концентраторов С принадлежит терригенным породам и продуктам их метаморфизма. Углерод – избыточный элемент, его содержание в осадочных породах 2.87%, что в 11.7 раза больше соответствующего таким продуктам выветривания гранитно-гнейсового слоя, которые могли образоваться без привноса С. Почти вся его масса (97.59%) находится в осадочных и параметаморфических породах, в том числе 58.83% – в карбонатных. В магматических породах осадочного и гранитно-гнейсового слоев сосредоточено только 1.19% массы С.

##### 5.1.2. Средний «минеральный» баланс С в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах

Углерод – уникальный элемент. Он характеризуется максимальной тенденцией к обособлению в собственных минералах. Поэтому, несмотря на относительно низкое среднее содержание в верхней части континентальной коры, по характеру среднего «минерального» баланса он похож на самые главные химические элементы. Почти вся его масса сосредоточена в собственных минералах и их аналогах – органических веществах. В верхней части континентальной коры и осадочном слое распределение массы С в ассоциациях минералов и органических веществ, характеризующихся разным содержанием С, бимодальное (табл. 5.2). Такая же ситуация наблюдается в большинстве осадочных (табл. 5.3) и параметаморфических пород (табл. 5.4). Так же как у большинства главных элементов собственные минералы углерода в качестве концентраторов-носителей образуют две главные совокупности, резко различающиеся по степени концентрации С. Разделяющий их интервал нехарактерной концентрации (КК 18.5–86)

Таблица 5.1  
Среднее содержание и распределение масс C, Si, Ge, Sn, Pb (%) в ассоциации горных пород верхней части континентальной коры

| Горные породы                             | Масса пород  | Среднее содержание |              |                            |                            |                             | Доли масс    |               |              |              |               |
|-------------------------------------------|--------------|--------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
|                                           |              | C                  | Si           | Ge                         | Sn                         | Pb                          | C            | Si            | Ge           | Sn           | Pb            |
| Пески и песчаники                         | 5.11         | 0.93               | 31.42        | 1.1·10 <sup>-4</sup>       | 2.8·10 <sup>-4</sup>       | 1.4·10 <sup>-3</sup>        | 5.86         | 5.67          | 4.32         | 4.05         | 4.19          |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4         | 1.4                | 26.88        | 2·10 <sup>-4</sup>         | 3.5·10 <sup>-4</sup>       | 1.4·10 <sup>-3</sup>        | 17.95        | 9.87          | 16           | 10.31        | 8.52          |
| Карбонатные породы                        | 3.85         | 9.79               | 5.92         | 3.6·10 <sup>-5</sup>       | 8·10 <sup>-5</sup>         | 7·10 <sup>-4</sup>          | 46.48        | 0.81          | 1.07         | 0.87         | 1.58          |
| Кремнистые породы                         | 0.33         | 0.88               | 38.32        | He опр.                    | 1.4·10 <sup>-4</sup>       | 6·10 <sup>-4</sup>          | 0.36         | 0.45          | He опр.      | 0.13         | 0.12          |
| Эвапориты                                 | 0.26         | 0.18               | 0.18         | 5·10 <sup>-5</sup>         | He опр.                    | He опр.                     | 0.06         | <0.01         | 0.1          | He опр.      | He опр.       |
| Кислые вулканы                            | 0.44         | 0.19               | 33.99        | 1·10 <sup>-4</sup>         | 3.5·10 <sup>-4</sup>       | 2.3·10 <sup>-3</sup>        | 0.1          | 0.53          | 0.34         | 0.44         | 0.59          |
| Средние вулканы                           | 1.13         | 0.13               | 27.44        | 1.5·10 <sup>-4</sup>       | 2.9·10 <sup>-4</sup>       | 1.8·10 <sup>-3</sup>        | 0.18         | 1.1           | 1.3          | 0.93         | 1.19          |
| Основные вулканы                          | 2.11         | 0.18               | 22.9         | 1.5·10 <sup>-4</sup>       | 2.5·10 <sup>-4</sup>       | 1.1·10 <sup>-3</sup>        | 0.47         | 1.71          | 2.43         | 1.49         | 1.36          |
| Граниты                                   | 8.21         | 0.03               | 33.83        | 2.8·10 <sup>-4</sup>       | 3·10 <sup>-4</sup>         | 1.9·10 <sup>-3</sup>        | 0.3          | 9.81          | 17.68        | 6.98         | 9.13          |
| Гранодиориты                              | 3.38         | 0.02               | 30.5         | 1.3·10 <sup>-4</sup>       | 2.2·10 <sup>-4</sup>       | 1.5·10 <sup>-3</sup>        | 0.08         | 3.64          | 3.38         | 2.11         | 2.97          |
| Базиты                                    | 1.5          | 0.033              | 23.54        | 1.4·10 <sup>-4</sup>       | 2.7·10 <sup>-4</sup>       | 6·10 <sup>-4</sup>          | 0.06         | 1.25          | 1.62         | 1.15         | 0.53          |
| Сyenиты                                   | 0.05         | 0.011              | 26.83        | 1·10 <sup>-4</sup>         | 4·10 <sup>-4</sup>         | 1.2·10 <sup>-3</sup>        | <0.01        | 0.05          | 0.04         | 0.06         | 0.03          |
| Ультрабазиты                              | 0.05         | 0.041              | 20.69        | 1.3·10 <sup>-4</sup>       | 5·10 <sup>-5</sup>         | 4.6·10 <sup>-5</sup>        | <0.01        | 0.04          | 0.05         | 0.01         | <0.01         |
| Метапесчаники                             | 2.92         | 0.34               | 33.84        | 8·10 <sup>-5</sup>         | 4.4·10 <sup>-4</sup>       | 1.8·10 <sup>-3</sup>        | 1.22         | 3.49          | 1.8          | 3.64         | 3.08          |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56        | 0.35               | 29.42        | 1.5·10 <sup>-4</sup>       | 4.6·10 <sup>-4</sup>       | 2·10 <sup>-3</sup>          | 13.19        | 31.75         | 35.26        | 39.82        | 35.78         |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13         | 8.86               | 7.35         | 3.9·10 <sup>-5</sup>       | 4.1·10 <sup>-4</sup>       | 1.3·10 <sup>-3</sup>        | 12.35        | 0.29          | 0.34         | 1.31         | 0.86          |
| Железистые породы                         | 0.38         | 0.25               | 23.73        | 2.5·10 <sup>-4</sup>       | 4.5·10 <sup>-4</sup>       | 2.7·10 <sup>-3</sup>        | 0.12         | 0.32          | 0.73         | 0.48         | 0.6           |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21        | 0.019              | 30.12        | 5·10 <sup>-5</sup>         | 3.3·10 <sup>-4</sup>       | 1.9·10 <sup>-3</sup>        | 0.54         | 24.69         | 8.93         | 21.7         | 25.82         |
| Метариолиты                               | 0.66         | 0.087              | 32.83        | 5·10 <sup>-5</sup>         | 5.3·10 <sup>-4</sup>       | 3.1·10 <sup>-3</sup>        | 0.07         | 0.76          | 0.25         | 0.99?        | 1.2           |
| Метантезиты                               | 1.03         | 0.2                | 27.41        | 5·10 <sup>-5</sup>         | 1.9·10 <sup>-4</sup>       | 1.2·10 <sup>-3</sup>        | 0.25         | 1             | 0.4          | 0.55         | 0.72          |
| Метабазиты                                | 3.29         | 0.076              | 24.19        | 9·10 <sup>-5</sup>         | 3·10 <sup>-4</sup>         | 9·10 <sup>-4</sup>          | 0.31         | 2.81          | 2.28         | 2.8          | 1.73          |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>   | <b>0.811</b>       | <b>28.32</b> | <b>1.3·10<sup>-4</sup></b> | <b>3.5·10<sup>-4</sup></b> | <b>1.71·10<sup>-3</sup></b> | <b>99.95</b> | <b>100.02</b> | <b>97.32</b> | <b>99.82</b> | <b>100.00</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95        | 2.87               | 23.84        | 1.4·10 <sup>-4</sup>       | 2.7·10 <sup>-4</sup>       | 1.23·10 <sup>-3</sup>       | 70.71        | 16.8          | 21.49        | 15.36        | 14.41         |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68         | 0.17               | 25.62        | 1.4·10 <sup>-4</sup>       | 2.7·10 <sup>-4</sup>       | 1.46·10 <sup>-3</sup>       | 0.75         | 3.33          | 4.07         | 2.86         | 3.14          |
| <b>Осадочный слой</b>                     | <b>23.63</b> | <b>2.45</b>        | <b>24.12</b> | <b>1.4·10<sup>-4</sup></b> | <b>2.7·10<sup>-4</sup></b> | <b>1.25·10<sup>-3</sup></b> | <b>71.46</b> | <b>20.13</b>  | <b>25.56</b> | <b>18.22</b> | <b>17.55</b>  |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19        | 0.028              | 31.73        | 2.2·10 <sup>-4</sup>       | 2.8·10 <sup>-4</sup>       | 1.6·10 <sup>-3</sup>        | 0.44         | 14.79         | 22.77        | 10.31        | 12.66         |
| Параметаморфиты                           | 34.99        | 0.62               | 29.01        | 1.4·10 <sup>-4</sup>       | 4.6·10 <sup>-4</sup>       | 1.97·10 <sup>-3</sup>       | 26.88        | 35.85         | 38.13        | 45.25        | 40.32         |
| Ортометаморфиты                           | 28.19        | 0.034              | 29.39        | 5.5·10 <sup>-5</sup>       | 3.3·10 <sup>-4</sup>       | 1.79·10 <sup>-3</sup>       | 1.17         | 29.26         | 11.86        | 26.04        | 29.47         |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой</b>            | <b>76.37</b> | <b>0.3</b>         | <b>29.62</b> | <b>1.2·10<sup>-4</sup></b> | <b>3.8·10<sup>-4</sup></b> | <b>1.85·10<sup>-3</sup></b> | <b>28.49</b> | <b>79.9</b>   | <b>72.76</b> | <b>81.6</b>  | <b>82.45</b>  |

Таблица 5.2

## Средний «минеральный» баланс С в верхней части континентальной коры и ее слоях, %

| Категории минералов как концентраторов С | Минералы              | Содержание С  | Осадочный слой       |             | Гранитно-гнейсовый слой |             | Верхняя часть континентальной коры |             |
|------------------------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|-------------|-------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
|                                          |                       |               | Содержание минералов | Доли масс С | Содержание минералов    | Доли масс С | Содержание минералов               | Доли масс С |
| Кларкминералы                            | Скаполиты             | 0.86          | Не опр.              | Не опр.     | 0.023                   | 0.07        | 0.018                              | 0.02        |
|                                          | Карбонат-апатит       | 1             | 0.035                | 0.01        | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01      | 0.001                              | < 0.01      |
|                                          | Бастнезит             | 5.4           | Не опр.              | Не опр.     | $4.2 \cdot 10^{-4}$     | 0.01        | $3.2 \cdot 10^{-4}$                | < 0.01      |
|                                          | Досонит               | 8.27          | 0.0006               | < 0.01      | Не опр.                 | Не опр.     | $1.8 \cdot 10^{-4}$                | < 0.01      |
|                                          | Сидерит               | 10.4          | 0.19                 | 0.81        | 0.096                   | 3.32        | 0.12                               | 1.54        |
|                                          | Родохрозит            | 10.44         | 0.0012               | 0.01        | 0.0012                  | 0.04        | 0.0012                             | 0.02        |
|                                          | Mg-сидерит            | 11.34         | Не опр.              | Не опр.     | 0.0078                  | 0.29        | 0.0059                             | 0.08        |
|                                          | Кутнагорит            | 11.7          | 0.0012               | 0.01        | 0.001                   | 0.04        | 0.001                              | 0.01        |
|                                          | Арагонит              | 11.7          | 0.16                 | 0.76        | Не опр.                 | Не опр.     | 0.038                              | 0.55        |
|                                          | Кальцит               | 12            | 13.94                | 69.28       | 0.9                     | 36          | 3.98                               | 58.89       |
|                                          | Мп-кальцит            | 12.04         | 0.0017               | 0.01        | $5.6 \cdot 10^{-4}$     | 0.02        | $8.3 \cdot 10^{-4}$                | 0.01        |
|                                          | Анкерит               | 12.5          | 0.072                | 0.37        | 0.018                   | 0.75        | 0.031                              | 0.48        |
|                                          | Доломит               | 12.9          | 1.94                 | 10.2        | 0.32                    | 13.96       | 0.7                                | 11.13       |
|                                          | Магнезит              | 14.2          | 0.0071               | 0.04        | 0.017                   | 0.8         | 0.015                              | 0.26        |
|                                          | Всего                 | —             | —                    | 81.5        | —                       | 55.13       | —                                  | 72.59       |
| ИНК                                      | Не установлены        | —             | —                    | —           | —                       | —           | —                                  | —           |
| Максиминералы и их аналоги               | Органические вещества | 85<br>(75–95) | 0.56                 | 19.43       | Не опр.                 | Не опр.     | 0.12                               | 12.58       |
|                                          | Графит                | 100           | 0.0063               | 0.26        | 0.13                    | 43.33       | 0.12                               | 14.8        |
|                                          | Всего                 | —             | —                    | 19.69       | —                       | 43.33       | —                                  | 27.38       |
| Сумма учтенных долей масс С              |                       | —             | —                    | 101.19      | —                       | 98.63       | —                                  | 100.37      |

Примечание. ИНК – минералы интервала нехарактерной концентрации.

выражен исключительно четко. Первая совокупность представлена кларк-минералами. Это карбонаты, среди которых главная роль принадлежит кальциту. В верхней части континентальной коры в кальците сконцентрировано 58.89% массы С. Вторая совокупность соответствует максиминералам. Она представлена графитом (14.8% массы С) и органическими веществами (12.58% массы С).

В осадочном и гранитно-гнейсовом слоях распределение массы С по категориям минералов-концентраторов разное (табл. 5.2). В осадочном слое почти 81.5% массы С сконцентрировано в карбонатах. В органических соединениях содержится около 1/5 части массы С. Роль графита мала. В гранитно-гнейсовом слое роль карбонатов и графита соизмерима. Главная причина такого различия – общеизвестный факт огромного «избытка» карбонатов кальция в осадочных породах. Карбонаты – главные носители С во всех осадочных породах, но особенно в карбонатных (табл. 5.3). В гранитно-гнейсовом слое особенности среднего минерального баланса С определяются ситуацией в параметаморфических породах. Группировка па-

Таблица 5.3

**Доли масс С (%), находящиеся в минералах осадочных пород континентальной коры**

| Категории минералов как концентраторов С | КК                      | Пески и песчаники | Глины и сланцы | Карбонатные породы | Кремнистые породы | Осадочные породы |
|------------------------------------------|-------------------------|-------------------|----------------|--------------------|-------------------|------------------|
| Кларкминералы                            | Карбонат-апатит         | 0.02              | < 0.01         | Не опр.            | Не опр.           | < 0.01           |
|                                          | Досонит                 | 0.01              | 0.01           | Не опр.            | Не опр.           | < 0.01           |
|                                          | Сидерит                 | 0.22              | 0.22           | 0.06               | Не опр.           | 0.11             |
|                                          | Родохрозит              | < 0.01            | < 0.01         | 0.01               | Не опр.           | 0.01             |
|                                          | Арагонит                | Не опр.           | Не опр.        | 1.2                | Не опр.           | 1.01             |
|                                          | Кальцит                 | 72.15             | 34.9           | 83.49              | 20.8              | 69.93            |
|                                          | Анкерит                 | 0.07              | 0.45           | 0.38               | Не опр.           | 0.37             |
|                                          | Доломит                 | 0.14              | 0.92           | 15.2               | Не опр.           | 10.29            |
|                                          | Магнезит                | Не опр.           | 0.05           | 0.04               | Не опр.           | 0.04             |
|                                          | Всего                   | 72.61             | 36.55          | 100.43             | 20.8              | 81.76            |
| Максиминералы и их аналоги               | Органические соединения | 30.11             | 57.1           | 3.68               | 54.5              | 19.86            |
|                                          | Графит                  | 0.02              | 7.14           | 1.02               | 22.7              | 2.61             |
|                                          | Всего                   | 30.13             | 64.24          | 4.7                | 77.2              | 22.47            |
| Сумма учтенных долей масс С              |                         | 102.74            | 100.79         | 105.13             | 98                | 104.23           |

Таблица 5.4

**Доли масс С (%), находящиеся в минералах параметаморфических пород континентальной коры**

| Категории минералов как концентраторов С | Минералы-носители | Метапесчаники | Пара-сланцы | Карбонатные породы | Железистые породы | Параметаморфиты |
|------------------------------------------|-------------------|---------------|-------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| Кларкминералы                            | Скаполиты         | Не опр.       | Не опр.     | 0.04               | Не опр.           | 0.02            |
|                                          | Сидерит           | 2.14          | 2.97        | 0.35               | 58.24             | 2.01            |
|                                          | Mg-сидерит        | Не опр.       | Не опр.     | 0.64               | 4.54              | 0.31            |
|                                          | Кальцит           | 17.65         | 10.3        | 63.7               | 0.48              | 35,03           |
|                                          | Анкерит           | Не опр.       | Не опр.     | 1.69               | 2.49              | 0.79            |
|                                          | Доломит           | 0.76          | 3.69        | 27.7               | 10.32             | 14.6            |
|                                          | Магнезит          | Не опр.       | Не опр.     | 0.16               | 28.4              | 0.85            |
|                                          | Всего             | 20.55         | 16.96       | 95.72              | 100.47            | 53.61           |
| Максиминерал                             | Графит            | 79.41         | 85.7        | Не опр.            | Не опр.           | 45.2            |
| Сумма учтенных долей масс С              |                   | 99.96         | 102.66      | 95.72              | 100.47            | 98.81           |

раметаморфических пород по характеру минерального баланса С делится на две части. Первая представлена продуктами метаморфизма терригенных пород. Здесь главную роль в качестве носителя С играет графит, подчиненную – карбонаты (табл. 5.4). Вторая часть представлена карбонатными и железистыми породами, где главные носители С карбонаты. Магматические и ортометаморфические породы почти не оказывают влияния на средний минеральный баланс С в верхней части континентальной коры. Наиболее важные носители С здесь кальцит, сидерит и, вероятно, газово-жидкие включения, находящиеся в силикатах и кварце.

### **5.1.3. Выводы**

Среднее содержание С в верхней части континентальной коры 0.811%. Оно максимально в осадочных и парапетаморфических породах, в них же находится почти вся масса С (97.59%). В верхней части континентальной коры С практически полностью сконцентрирован в собственных минералах и их аналогах – органических веществах, в том числе, %: в кальците – 58.89, графите – 14.8, органических веществах – 12.48, доломите – 11.13, сидерите – 1.54, арагоните – 0.55, анкерите – 0.48, магнезита – 0.26, Mg-сидерите – 0.08, родохрозите – 0.02, скаполите – 0.02, Mn-кальците – 0.01, кутнагорите – 0.01. Роль максиминералов играют органические вещества и графит.

## **5.2. КРЕМНИЙ**

### **5.2.1. Среднее содержание и распределение масс Si в верхней части континентальной коры**

Средние содержания Si в горных породах (см. табл. 5.1), составляющих верхнюю часть континентальной коры и в ее слоях, соответствуют опубликованным ранее (Григорьев, 2003) и преимущественно заимствованным у А.Б. Ронова с соавторами (1990). Среднее содержание Si в верхней части континентальной коры 28.32%. Эта величина не выходит за пределы данных других исследователей (28.11–31.74%) (Rudnick, Gao, 2004). Среднее содержание Si максимально в кремнистых породах, второе место занимают метапесчаники и граниты. Кремний – сбалансированный элемент, его среднее содержание в осадочных породах 23.84% практически равно тому, которое должно быть в полном наборе продуктов выветривания гранитно-гнейсового слоя современного состава – 24.29%.

### **5.2.2. Средний минеральный баланс Si в верхней части континентальной коры и в составляющих ее горных породах**

В масштабах всей верхней части континентальной коры распределение масс Si в ассоциации минералов-концентраторов близко к бимодальному (табл. 5.5). Практически вся его масса делится между двумя группировками минералов: силикатами (включая алюмосиликаты) с содержанием Si 10–32.5% и оксидами с содержанием Si > 41%. В силикатах находится почти 60% всей массы Si, в оксидах – чуть больше 40%. Силикаты являются миниминералами и кларкминералами, оксиды – максиминералами. Главные миниминералы слоистые и цепочечные алюмосиликаты, главные кларкминералы кислые плагиоклазы и калиевые полевые шпаты. Среди максиминералов Si резко преобладает кварц, заметна также роль опала. В кристаллите и тридимите сконцентрировано < 0.01% массы Si. Интервал нехарактерной концентрации относительно небольшой (32.5–41%), но очень четкий. Он представлен практически только кислыми вулканическими стеклами. Роль их в качестве носителей Si в масштабах верхней части континентальной коры ничтожна.

Таблица 5.5

**Средний минеральный баланс Si в верхней части  
континентальной коры и ее слоях, %**

| Категории минералов как концентратов Si | Минералы        | Содержание Si | Осадочный слой       |              | Гранитно-гнейсовый слой |              | Верхняя часть континентальной коры |              |
|-----------------------------------------|-----------------|---------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|
|                                         |                 |               | Содержание минералов | Доли масс Si | Содержание минералов    | Доли масс Si | Содержание минералов               | Доли масс Si |
| Миниминералы Si < 25%                   | Рипидолит       | 10.8          | 1.68                 | 0.75         | 1.96                    | 0.72         | 1.89                               | 0.72         |
|                                         | Биотит          | 16.6          | 3.97                 | 2.73         | 8.59                    | 4.81         | 7.49                               | 4.39         |
|                                         | Эпидот          | 17.1          | 0.16                 | 0.11         | 1.48                    | 0.85         | 1.17                               | 0.71         |
|                                         | Силлманит       | 17.2          | 0.0069               | < 0.01       | 0.37                    | 0.21         | 0.29                               | 0.18         |
|                                         | Альмандин       | 17.8          | 0.014                | 0.01         | 1.11                    | 0.67         | 0.85                               | 0.53         |
|                                         | Мусковит        | 21.4          | 2.97                 | 2.64         | 1.69                    | 1.22         | 1.99                               | 1.5          |
|                                         | Каолинит        | 21.4          | 1.08                 | 0.96         | Не опр.                 | Не опр.      | 0.26                               | 0.2          |
|                                         | Нонтронит       | 22            | 2.41                 | 2.2          | Не опр.                 | Не опр.      | 0.57                               | 0.44         |
|                                         | Гидромусковит   | 22.2          | 10.56                | 9.72         | Не опр.                 | Не опр.      | 2.51                               | 1.97         |
|                                         | Гидробиотит     | 22.5          | 2.02                 | 1.89         | Не опр.                 | Не опр.      | 0.48                               | 0.38         |
|                                         | Роговая обманка | 23.4          | 1.07                 | 1.04         | 3.81                    | 3.01         | 3.16                               | 2.61         |
|                                         | Гиперстен       | 23.5          | 0.7                  | 0.68         | 0.34                    | 0.27         | 0.43                               | 0.36         |
|                                         | Битовнит        | 23.6          | 0.47                 | 0.46         | 0.25                    | 0.2          | 0.3                                | 0.25         |
|                                         | Актинолит       | 24.1          | 0.061                | 0.06         | 0.49                    | 0.4          | 0.39                               | 0.33         |
|                                         | Авгит           | 24.2          | 1.45                 | 1.45         | 1.13                    | 0.92         | 1.21                               | 1.03         |
|                                         | Куммингтонит    | 24.3          | Не опр.              | Не опр.      | 0.6                     | 0.49         | 0.46                               | 0.4          |
|                                         | Диопсид         | 24.4          | 0.44                 | 0.45         | 0.49                    | 0.4          | 0.48                               | 0.41         |
|                                         | Лабрадор        | 24.9          | 3.62                 | 3.74         | 2.84                    | 2.39         | 3.02                               | 2.66         |
|                                         | Прочие          | < 25          | Не опр.              | 3.56         | Не опр.                 | 2.25         | Не опр.                            | 2.6          |
|                                         | Всего           | –             | –                    | 32.45        | –                       | 18.81        | –                                  | 21.67        |
| Кларкминералы Si 25–32.5%               | Монтмориллонит  | 27.4          | 1.84                 | 2.09         | Не опр.                 | Не опр.      | 0.43                               | 0.42         |
|                                         | Андезин         | 27.6          | 3.06                 | 3.5          | 7.64                    | 7.12         | 6.56                               | 6.39         |
|                                         | Олигоклаз       | 29.5          | 3.52                 | 4.31         | 17.64                   | 17.6         | 14.31                              | 14.91        |
|                                         | КПШ             | 30.5          | 4.39                 | 5.55         | 11.49                   | 11.8         | 9.81                               | 10.57        |
|                                         | Альбит          | 31.2          | 2.93                 | 3.79         | 4.33                    | 4.56         | 4                                  | 4.41         |
|                                         | Прочие          | 25–32.5       | Не опр.              | 2.73         | Не опр.                 | 0.16         | Не опр.                            | 0.33         |
|                                         | Всего           | –             | –                    | 21.97        | –                       | 41.24        | –                                  | 37.03        |
| ИНК Si 32.5–41%                         | Стекло кислое   | –             | –                    | 0.18         | –                       | Не опр.      | –                                  | 0.04         |
| Максиминералы Si > 41%                  | Опал            | 41.7          | 5.5                  | 9.5          |                         |              | 0.063                              | 1.91         |
|                                         | Кварц           | 46.7          | 18.56                | 35.9         | 25.64                   | 40.4         | 22.91                              | 39.54        |
|                                         | Всего           | –             | –                    | 45.4         | –                       | 40.4         | –                                  | 41.45        |
| Сумма учтенных долей масс Si            |                 | –             | –                    | 100          | –                       | 100.45       | –                                  | 100.19       |

Таблица 5.6

**Средний минеральный баланс Si в важнейших ассоциациях горных пород,  
слагающих верхнюю часть континентальной коры**

| Минералы          | Породы    |         |               |         |                |         |                     |         |                     |         |
|-------------------|-----------|---------|---------------|---------|----------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|
|                   | Осадочные |         | Вулканогенные |         | Магматические* |         | Параметаморфические |         | Ортометаморфические |         |
|                   | 1         | 2       | 1             | 2       | 1              | 2       | 1                   | 2       | 1                   | 2       |
| Тюрингит          | Не опр.*  | Не опр. | 0.75          | 0.29    | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | 0.25                | 0.08    |
| Рипидолит         | 1.94      | 0.88    | 0.25          | 0.1     | 1.36           | 0.46    | 1.42                | 0.53    | 2.93                | 1.08    |
| Клинохлор         | 0.51      | 0.3     | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | 1.66                | 0.8     | 0.023               | 0.01    |
| Шамозит           | 2.74      | 1.43    | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Биотит            | 3.57      | 2.49    | 6.16          | 3.99    | 5.84           | 3.06    | 8.46                | 4.84    | 10.06               | 5.68    |
| Эпидот            | 0.11      | 0.08    | 0.42          | 0.28    | 0.13           | 0.07    | 2.34                | 1.38    | 1.04                | 0.61    |
| Силлманит         | 0.008     | < 0.01  | Не опр.       | Не опр. | < 0.01         | < 0.01  | 0.79                | 0.47    | 0.027               | 0.02    |
| Альмандин         | 0.017     | 0.01    | < 0.01        | < 0.01  | 0.03           | 0.02    | 1.49                | 0.91    | 1.14                | 0.69    |
| Гастингсит        | Не опр.   | Не опр. | Не опр.       | Не опр. | 0.072          | 0.04    | Не опр.             | Не опр. | 1.06                | 0.67    |
| Парагонит         | 0.78      | 0.7     | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | 1.15                | 0.85    | Не опр.             | Не опр. |
| Мусковит          | 3.39      | 3.04    | 0.72          | 0.6     | 0.84           | 0.57    | 2.52                | 1.86    | 1.07                | 0.78    |
| Каолинит          | 1.28      | 1.15    | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Бейделлит         | 0.78      | 0.7     | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Нонтронит         | 2.86      | 2.64    | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Глауконит         | 0.64      | 0.58    | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Гидромусковит     | 12.51     | 11.65   | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Гидробиотит       | 2.39      | 2.26    | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Роговая обманка   | 0.55      | 0.54    | 3.86          | 3.53    | 1.84           | 1.36    | 5.32                | 4.29    | 2.86                | 2.28    |
| Гиперстен         | < 0.01    | < 0.01  | 4.48          | 4.1     | 0.32           | 0.24    | 0.074               | 0.06    | 0.66                | 0.53    |
| Пижонит           | Не опр.   | Не опр. | 1.87          | 1.72    | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Анортит           | < 0.01    | < 0.01  | 0.63          | 3.53    | 0.055          | 0.04    | 0.001               | < 0.01  | < 0.01              | < 0.01  |
| Битовнит          | 0.1       | 0.1     | 2.5           | 2.3     | 0.33           | 0.25    | 0.002               | < 0.01  | 0.52                | 0.42    |
| Актинолит         | 0.039     | 0.04    | 0.18          | 0.17    | Не опр.        | Не опр. | 0.52                | 0.43    | 0.67                | 0.55    |
| Авгит             | < 0.01    | < 0.01  | 9.26          | 8.75    | 1.41           | 1.08    | 0.37                | 0.31    | 1.94                | 1.6     |
| Куммингтонит      | Не опр.   | Не опр. | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | 0.71                | 0.59    | 0.75                | 0.62    |
| Диопсид           | 0.039     | 0.04    | 2.6           | 2.48    | 0.95           | 0.73    | 0.49                | 0.41    | 0.27                | 0.22    |
| Лабрадор          | 0.62      | 0.65    | 19.91         | 19.35   | 2.52           | 1.98    | 1.79                | 1.54    | 4.31                | 3.65    |
| Прочие            | 0.07      | 0.07    | 1.76          | 1.5     | 0.86           | 0.74    | 5.16                | 2.68    | 1.19                | 0.78    |
| Всего             | 34.94     | 29.35   | 55.35         | 49.66   | 16.56          | 10.64   | 34.27               | 21.95   | 30.77               | 20.27   |
| Монтмориллонит    | 2.18      | 2.51    | Не опр.       | Не опр. | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Андезин           | 1.68      | 1.95    | 10.57         | 11.39   | 9.01           | 7.84    | 6.27                | 5.97    | 8.72                | 8.19    |
| Олигоклаз         | 3.51      | 4.34    | 3.56          | 4.1     | 24.53          | 22.8    | 11.08               | 11.3    | 22.53               | 22.6    |
| Стекло основное   | Не опр.   | Не опр. | 8.42          | 9.7     | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| КППШ              | 4.51      | 5.77    | 3.76          | 4.48    | 19.52          | 18.8    | 8.2                 | 8.62    | 11.81               | 12.3    |
| Санидин           | Не опр.   | Не опр. | 1.67          | 1.96    | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Альбит            | 2.8       | 3.66    | 3.66          | 4.46    | 2.41           | 2.37    | 6.89                | 7.41    | 2.06                | 2.19    |
| Прочие            | 0.32      | 0.4     | 0.88          | 0.92    | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Всего             | 15.08     | 18.63   | 32.52         | 37.01   | 55.47          | 51.81   | 32.44               | 33.3    | 45.12               | 45.28   |
| ИНК Стекло кислое | < 0.01    | < 0.01  | 0.84          | 1.11    | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Опал              | 6.51      | 11.38   | 0.053         | 0.09    | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Кварц             | 20.76     | 40.67   | 6.6           | 12.03   | 25.39          | 37.4    | 28.83               | 46.4    | 21.8                | 34.6    |
| Прочие            | Не опр.   | Не опр. | 0.052         | 0.09    | Не опр.        | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. |
| Всего             | 27.27     | 52.05   | 6.7           | 12.21   | 25.39          | 37.4    | 28.83               | 46.4    | 21.8                | 34.6    |
| Сумма             | 77.21     | 100.03  | 95.41         | 99.99   | 97.42          | 99.85   | 95.54               | 101.65  | 97.69               | 100.15  |

Примечание. 1 – содержание минералов, 2 – доли масс Si, сосредоточенные в минералах. \* Магматические породы гранитно-гнейсового слоя.

**Роль оксидов как носителей Si в горных породах**

| Горные породы                        | Доли масс Si, сконцентрированные в оксидах, % |       |          |             |       |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|----------|-------------|-------|
|                                      | Опал                                          | Кварц | Тридимит | Кристобалит | Всего |
| Пески и песчаники                    | 10.87                                         | 51.28 | Не опр.  | Не опр.     | 62.15 |
| Глины и глинистые сланцы             | 10.63                                         | 34.23 | Не опр.  | Не опр.     | 44.86 |
| Карбонатные породы                   | 21.11                                         | 28.4  | Не опр.  | Не опр.     | 49.51 |
| Кремнистые породы                    | 16.74                                         | 70.44 | Не опр.  | Не опр.     | 87.18 |
| Кислые вулканиды                     | 0.25                                          | 43.42 | 0.21     | 0.07        | 43.95 |
| Средние вулканиды                    | Не опр.                                       | 14.98 | Не опр.  | Не опр.     | 14.98 |
| Основные вулканиды                   | 0.09                                          | 0.41  | Не опр.  | 0.1         | 0.6   |
| Граниты                              | Не опр.                                       | 42.8  | Не опр.  | Не опр.     | 42.8  |
| Гранодиориты                         | Не опр.                                       | 32.15 | Не опр.  | Не опр.     | 32.15 |
| Базиты                               | Не опр.                                       | 12.1  | Не опр.  | Не опр.     | 12.1  |
| Сиениты                              | Не опр.                                       | 7.83  | Не опр.  | Не опр.     | 7.83  |
| Метапесчаники                        | Не опр.                                       | 64.2  | Не опр.  | Не опр.     | 64.2  |
| Парагнейсы и парасланцы              | Не опр.                                       | 44.4  | Не опр.  | Не опр.     | 44.4  |
| Метаморфизованные карбонатные породы | Не опр.                                       | 30.5  | Не опр.  | Не опр.     | 30.5  |
| Железистые породы                    | Не опр.                                       | 61.1  | Не опр.  | Не опр.     | 61.1  |
| Гранито-гнейсы                       | Не опр.                                       | 37.2  | Не опр.  | Не опр.     | 37.2  |
| Метариолиты                          | Не опр.                                       | 49.8  | Не опр.  | Не опр.     | 49.8  |
| Метаандезиты                         | Не опр.                                       | 26.75 | Не опр.  | Не опр.     | 26.75 |
| Метабазиты                           | Не опр.                                       | 10.6  | Не опр.  | Не опр.     | 10.6  |

В осадочном и гранитно-гнейсовом слоях распределение масс Si по разным категориям минералов-концентраторов (см. табл. 5.5) близкое и похожее, но в осадочном слое ассоциации осадочных и вулканогенных пород резко отличаются по характеру минерального баланса Si (табл. 5.6). В осадочных породах роль оксидов максимальная, в них сконцентрировано больше половины массы Si. В вулканогенных породах ситуация противоположная, роль оксидов здесь минимальна. В них сконцентрировано всего 12.21% массы Si. Важнейшие ассоциации горных пород гранитно-гнейсового слоя характеризуются промежуточными средними минеральными балансами Si. Роль оксидов как носителей масс Si максимальна в кремнистых породах, песках (включая песчаники), метапесчаниках и железистых породах (табл. 5.7).

### 5.2.3. Выводы

Среднее содержание Si в верхней части континентальной коры 28.32%. Практически вся масса Si сосредоточена в кремниевых минералах. Главные его миниминералы и кларкминералы силикаты. В верхней части континентальной коры в них сосредоточено, соответственно, 21.67 и 37.03% массы Si. Максиминералы – оксиды, в которых сконцентрировано 41.45% массы Si. Главные среди них кварц и опал. Роль максиминералов максимальна в осадочных породах, здесь в оксидах сконцентрировано 52.05% массы Si.



## **5.3. ГЕРМАНИЙ**

### **5.3.1. Среднее содержание и распределение масс Ge в верхней части континентальной коры**

В минералого-геохимическом отношении Ge – один из наименее изученных элементов. Приводимые здесь (см. табл. 5.1) величины среднего содержания Ge в континентальных горных породах авторские. Они рассчитаны с учетом ограниченного количества данных и требуют уточнения. Особенно это относится к ортометаморфическим породам кислого и среднего состава. Характеристика исходных данных приведена раньше (Григорьев, 2002). Полученная автором величина среднего содержания Ge в верхней части континентальной коры –  $1.3 \cdot 10^{-4} \%$  – близка к величинам  $1.32 \cdot 10^{-4}$ – $1.6 \cdot 10^{-4} \%$ , приводившимся в последние годы другими авторами (Rudnick, Gao, 2004). Согласно полученным данным, максимальным средним содержанием Ge характеризуются граниты, железистые породы, глины и глинистые сланцы, но средние коэффициенты концентрации невелики – 1.5–2.2, поэтому и массы Ge распределены в ассоциации горных пород почти пропорционально массе последних.

### **5.3.2. О минеральном балансе Ge**

Данные о содержании германиевых минералов в распространенных горных породах автору не известны. Содержание Ge больше минимального для максиминералов – 0.04% (Григорьев, 1999). Такое содержание иногда отмечают в касситерите, топазе, гематите и некоторых других минералах. Но это эпизодические данные. Пока автором определены только 4 минеральных баланса Ge. Изучены скарны месторождений Турьинской группы на Северном Урале с содержанием Ge, близким к кларковому, – 0.0001–0.0005%. В изученных пробах большая часть массы Ge находится в пороодообразующих минералах, меньшая – сконцентрирована в пирите и магнетите (табл. 5.8, 5.9). Содержание Ge во всех проанализированных минералах-концентраторах меньше минимального для максиминералов.

## **5.4. ОЛОВО**

### **5.4.1. Среднее содержание и распределение масс Sn в верхней части континентальной коры**

Вариации содержания Sn в большинстве горных пород изучены недостаточно, относительно хорошо изучены только гранитоиды, парасланцы и парagneйсы. Средние содержания Sn в континентальных породах (см. табл. 5.1) рассчитаны вновь и несколько отличаются от приведенных раньше (Григорьев, 2002а). Основные источники исходных данных: осадочные породы (Глухан, Серых, 1999, 2000, 2001; Некрасов, 1966); вулканы осадочного слоя (Геохимия континентального..., 1987; Горкун, 1963; Карапетян, Ме-

Таблица 5.8  
Минеральный баланс Ge, Sn, Pb в скарнах Ново-Песчанского месторождения Турьинской группы, Северный Урал

| Минералы | НП-8803 |         |     |         |    |         | НП-8806 |         |         |     |         |    |         |   |
|----------|---------|---------|-----|---------|----|---------|---------|---------|---------|-----|---------|----|---------|---|
|          | Ge      |         |     | Sn      |    |         | Pb      |         |         | Ge  |         |    | Sn      |   |
|          | 1       | 2       | 3   | 2       | 3  | 6       | 2       | 3       | 1       | 2   | 2       | 2  | 2       | 3 |
| Пирит    | 5.9     | Не обн. | 0   | 2       | 6  | 18      | 21      | 1       | Не обн. | 0   | Не обн. | 0  | Не обн. | 0 |
| Магнетит | Не обн. | —       | 0   | —       | 0  | —       | 0       | 1.2     | 24      | 14  | 22      | 26 | 0       |   |
| Кварц    | 38      | Не обн. | 0   | Не обн. | 0  | Не обн. | 0       | 13      | Не обн. | 0   | Не обн. | 0  | 0       |   |
| Кальцит  | 19      | Не обн. | 0   | Не обн. | 0  | Не обн. | 0       | 52      | Не обн. | 0   | Не обн. | 0  | 0       |   |
| Анрадит  | 10      | 2       | 20  | 6       | 30 | 6       | 12      | 32      | 6       | 96  | 2       | 64 | 0       |   |
| Эпидот   | 24      | 3       | 72  | 4       | 48 | 15      | 72      | Не обн. | —       | 0   | —       | 0  | 0       |   |
| Хлорит   | 2.7     | 3       | 8   | 7       | 9  | 3       | 2       | 0.7     | Не обн. | 0   | Не обн. | 0  | 0       |   |
| В пробе  | 99.6    | 1       | 100 | 2       | 93 | 5       | 107     | 99.9    | 2       | 110 | 1       | 90 | 90      |   |

Примечание. Здесь и в табл. 5.9: 1 – минеральный состав проб, %, 2 – содержание химических элементов,  $10^{-4}$  % (средние из 2–8 параллельных приближенно-количественных спектральных анализов), 3 – доли массы химических элементов и их суммы, %.

Таблица 5.9  
Минеральный баланс Ge, Sn, Pb в скарнах Башмаковского месторождения Турьинской группы, Северный Урал

| Минералы    | Бш-8816 |         |    |         |    |         | Бш-8817 |         |         |    |         |         |         |    |         |    |  |  |
|-------------|---------|---------|----|---------|----|---------|---------|---------|---------|----|---------|---------|---------|----|---------|----|--|--|
|             | Ge      |         |    | Sn      |    |         | Pb      |         |         | Ge |         |         | Sn      |    |         | Pb |  |  |
|             | 1       | 2       | 3  | 2       | 3  | 2       | 3       | 2       | 3       | 1  | 2       | 3       | 2       | 3  | 2       | 3  |  |  |
| Халькопирит | 0.92    | 37      | 7  | Не обн. | 0  | 180     | 7       | 0.13    | 91      | 2  | 2       | 2       | 2       | <1 | 38      | <1 |  |  |
| Галенит     | 0.0007  | Не обн. | 0  | Не обн. | 0  | 86.6%*  | 24      | 0.0016  | Не обн. | 0  | Не обн. | Не обн. | Не обн. | 0  | 86.6%*  | 36 |  |  |
| Кварц       | 1.4     | Не обн. | 0  | Не обн. | 0  | Не обн. | 0       | 0.3     | Не обн. | 0  | Не обн. | Не обн. | Не обн. | 0  | Не обн. | 0  |  |  |
| Кальцит     | 6.2     | Не обн. | 0  | 1       | 3  | 10      | 2       | 13      | Не обн. | 0  | Не обн. | Не обн. | Не обн. | 0  | 7       | 2  |  |  |
| Анрадит     | 73      | 5       | 73 | 2       | 73 | 17      | 50      | 83      | 5       | 83 | 2       | 83      | 2       | 83 | 25      | 55 |  |  |
| Пироксен    | 17      | 2       | 7  | 2       | 17 | 26      | 18      | Не обн. | —       | 0  | —       | 0       | —       | 0  | —       | 0  |  |  |
| Хлорит      | 1.1     | Не обн. | 0  | Не обн. | 0  | Не обн. | 0       | 2.6     | Не обн. | 0  | Не обн. | Не обн. | Не обн. | 0  | Не обн. | 0  |  |  |
| В пробе     | 99.6207 | 5       | 87 | 2       | 93 | 25      | 101     | 99.0316 | 5       | 85 | 2       | 83      | 38      | 93 | 93      | 93 |  |  |

\* Содержание Pb в галените принято условно соответствующим теоретическому.

ликсетян, 1981; Лебедева, 1981; Нестеренко, Альмухамедов, 1973; Петрография..., 1986); граниты, гранодиориты, базиты, сиениты, ультрабазиты (Беус и др., 1976; Овчинников, 1990); метапесчаники (Волкова и др., 1994; Кременецкий, Овчинников, 1986; Петрова и др., 1995); парагнейсы и парасланцы (Волкова и др., 1994; Геохимия магматизма, 1982; Говоров и др., 1970; Кременецкий, Овчинников, 1986; Литология..., 1974; Макрыгина, Петров, 1975; Некрасов, 1966); метакарбонатные породы (Кременецкий, Овчинников, 1986; Литология..., 1974; Петрова, Левицкий, 1984); железистые породы (Ганзеев и др., 1977; Ситько и др., 1971); гранито-гнейсы (Говоров и др., 1970; Кременецкий, Овчинников, 1986; Макрыгина, Петрова, 1996; Милловский и др., 1985; Некрасов, 1966; Резников, Ишевская, 1972); метавулканиды (Кременецкий, Овчинников, 1986). Кроме того, была использована часть данных о содержании Sn в горных породах континентов из книги В.В. Иванова (1996, кн. 3).

Установлено, что среднее содержание Sn в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры (табл. 5.1), варьирует относительно слабо. Главные концентраторы Sn параметаморфические породы (в метариолитах среднее содержание Sn, вероятно, существенно преувеличено), но средние коэффициенты концентрации здесь минимальные – 1.2–1.3. Среднее содержание Sn в верхней части континентальной коры, по новым данным,  $3.5 \cdot 10^{-4} \%$ . Оно не выходит за пределы значений  $1.73 \cdot 10^{-4}$ – $5.5 \cdot 10^{-4} \%$ , приводившихся в литературе (Rudnick, Gao, 2004). Главные носители Sn метаморфические породы, в которых сконцентрировано 71.29% массы этого элемента. В верхней части континентальной коры Sn слабо недостаточный элемент. Его среднее содержание в совокупности континентальных осадочных пород ( $2.7 \cdot 10^{-4} \%$ ) несколько меньше того, которое могло быть унаследовано от гранитно-гнейсового слоя современного состава ( $3.1 \cdot 10^{-4} \%$ , расчет изоалюминиевым методом).

#### 5.4.2. О минеральном балансе Sn в горных породах и рудах

Известно большое количество минералов Sn, но при количественных и полуколичественных минералогических анализах горных пород был учтен только касситерит, причем не всегда. Среди неоловянных минералов максимальными содержаниями Sn характеризуются ниобиевые, танталовые, титановые, иногда турмалин, сфалерит, пирит, пирротин, гранаты астрофиллит. Но содержание больше 0.2% (минимального для максиминералов), преобладает только у членов ряда колумбит–танталит и фергусонита.

Определено больше 150 минеральных балансов Sn в различных горных породах, преимущественно магматических (Антипин и др., 1981; Бровчук, Миرونюк, 1969; Геохимия мезозойских..., 1984; Иванова, Бутузова, 1968; Коваленко, Пополитов, 1970; Кудрявцева, Ильина, 1982; Кузьмин, Антипин, 1972; Леонова, Легейдо, 1975; Недашковский и др., 1969; Петрова, Легейдо, 1965; Рипп, 1976; Сабельников, 1989; Таусон и др., 1966; Толок и др., 1971; Хрусталева, 1990). Согласно полученным данным, в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры, массы Sn находятся практически полностью в породообразующих минералах, но необходимо

**Вариации минеральных**

| Минералы    | 2225    |         |    | 65н     |         |    |
|-------------|---------|---------|----|---------|---------|----|
|             | 1       | 2       | 3  | 1       | 2       | 3  |
| Магнетит    | 0.6     | 40      | 7  | Не обн. | Не опр. | 0  |
| Кварц       | 28      | 2       | 16 | 32.5    | 6.2     | 53 |
| Касситерит  | Не обн. | Не опр. | 0  | 0.0001  | 780 000 | 21 |
| Турмалин    | Не обн. | Не опр. | 0  | Не обн. | Не опр. | 0  |
| Мусковит    | Не обн. | Не опр. | 0  | Не обн. | Не опр. | 0  |
| Биотит      | 1.4     | 60      | 23 | 1.5     | 20      | 8  |
| Плагиоклазы | 70      | 2.5     | 49 | 66      | 1       | 17 |
| КПШ*        | 70      |         |    | 66      |         |    |
| В граните   | 100     | 3.6     | 95 | 100     | 3.8     | 99 |

\* КПШ – калиевые полевые шпаты. 2225, 65н, 47м – Витимское плоскогорье, Сибирь (Хрусталеv, 1990); Б –

отметить, по крайней мере, два недостатка имеющихся данных. Почти все минеральные балансы рассчитаны для горных пород, являющихся второстепенными носителями Sn, прежде всего для гранитов. И даже при наличии касситерита он не всегда учитывался. С учетом этого рассмотрим полученные результаты. Песчаные породы представлены всего одной сводной пробой супесей из россыпей Северо-Востока СССР (Патык-Кара и др., 1990). Содержание Sn здесь очень высокое – 0.0335%. Доля массы Sn, сконцентрированная в частицах касситерита крупностью 50–100 мкм, – 71.2%. Для кислых вулканогенных пород с повышенным содержанием Sn ( $1.4 \cdot 10^{-4}$ –0.0214%) определено 28 минеральных балансов. Касситерит не установлен. Главные носители Sn стекло и продукты его раскристаллизации (Антипин и др., 1981; Геохимия мезозойских..., 1984; Леонова, Легейдо, 1975). Для гранитов (включая амазонитовые граниты и гранитные пегматиты) определено 84 минеральных баланса Sn (Бровчук, МIRONЮК, 1969; Иванова, Бутузова, 1968; Каширин, Легейдо, 1967; Коваленко, Пополитов, 1970; Кузьмин, Антипин, 1972; Недашковский и др., 1969; Петрова, Легейдо, 1965; Рипп, 1976; Сабельников, 1989; Таусон и др., 1966; Хрусталеv, 1990). Содержание Sn в исследованных пробах от  $2.8 \cdot 10^{-4}$  до 0.016%. В пробах, где содержание Sn околосларковое ( $< 5 \cdot 10^{-4}$ %), встречаемость касситерита 7%. Доли массы Sn, сконцентрированные в касситерите, 0–21%. При большем содержании Sn в гранитоидах встречаемость касситерита 19%, доли массы Sn, сконцентрированные в нем, 0–40%. Но большинство данных по гранитоидам некорректно. Касситерит чаще всего не учитывали, даже если он был установлен. Некоторое представление о вариациях роли касситерита в гранитах дают данные, приведенные в табл. 5.10. Сиениты и прочие щелочные породы изучены на примере 22 проб с содержанием Sn  $3.3 \cdot 10^{-4}$ –0.05% (Каширин, Легейдо, 1967; Коваленко и др., 1968; Коваленко, Пополитов, 1970; Недашковский и др., 1969). Касситерит не установлен. Важнейшие концентраторы Sn титанит, ильменит, астрофиллит, последний часто является максиминералом. В плагиосланцах Алдана, содержащих

**балансов Sn в гранитах**

| Б             |                |        | 47м           |                |         | В             |              |        |
|---------------|----------------|--------|---------------|----------------|---------|---------------|--------------|--------|
| 1             | 2              | 3      | 1             | 2              | 3       | 1             | 2            | 3      |
| Не обн.<br>37 | Не опр.<br>0.9 | 0<br>5 | Не обн.<br>25 | Не опр.<br>7.4 | 0<br>24 | Не обн.<br>35 | Не опр.<br>5 | 0<br>6 |
| Не обн.       | Не опр.        | 0      | 0.0004        | 780 000        | 40      | Не обн.       | Не опр.      | 0      |
| Не обн.       | Не опр.        | 0      | Не обн.       | Не опр.        | 0       | 1.5           | 20           | 1      |
| Не обн.       | Не опр.        | 0      | Не обн.       | Не опр.        | 0       | 8             | 240          | 64     |
| 2.7           | 200            | 1.5    | 0.2           | 22             | 1       | 1.5           | 200          | 10     |
| 30            | 3.1            | 13     | 74.8          | 2.6            | 25      | 52            | 10           | 17     |
| 30            | 1.2            | 5      | 74.8          |                |         | 52            |              |        |
| 99.7          | 7.1            | 9      | 100           | 7.8            | 90      | 98            | 30           | 98     |

Соктуйский массив, Забайкалье (Кузьмин, Антипин, 1972); В – Малый Хинган (Бровчук, Миронюк, 1969).

$2.2 \cdot 10^{-4}$ – $1.6 \cdot 10^{-3}$  % Sn, определено 9 минеральных балансов (Петрова, Легейдо, 1976). Касситерит не установлен. В полиметаллических рудах, содержащих Sn  $2.2 \cdot 10^{-4}$ – $7.1 \cdot 10^{-3}$  %, касситерит не установлен (Рипп, 1976). Почти вся масса Sn находится в сфалерите и галените. При содержании же Sn 0.11–0.27% в касситерите сконцентрировано 70–87% его массы (Кудрявцева, Ильина, 1982). В четырех пробах скарнов Cu–Fe-скарновых месторождений Турьинской группы, содержащих  $1 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-4}$  % Sn, этот элемент в основном рассеян в породообразующих минералах (см. табл. 5.8, 5.9). Лишь в одной пробе 26% массы Sn сконцентрировано в магнетите. Имеются два некорректных минеральных баланса Sn в оловянных рудах скарнового типа, содержащих 0.404 и 0.559% Sn. Здесь в касситерите сконцентрировано 94.5 и 64.3% всей массы Sn (Иванов и др., 1989). В последнем случае максиминалами Sn являются гранаты (содержание Sn 0.9%, сконцентрированная доля массы Sn 24.2%). В целом приведенные выше данные свидетельствуют о наличии зависимости роли касситерита в качестве носителя Sn от валового содержания этого элемента в горных породах и рудах, а также от особенностей минерального состава и генезиса этих веществ. Оценка средней роли касситерита в горных породах только на основании подобных данных была бы неполной и некорректной.

#### 5.4.3. Средние доли масс Sn, сконцентрированные в касситерите

Средние содержания касситерита в горных породах рассчитаны по опубликованным результатам более чем 2160 количественных и полуколичественных минералогических анализов. Наиболее хорошо изучены пески и песчаники включая другие близкие к ним по составу осадочные породы (> 990 проб), граниты (379 проб), сиениты (210 проб) и гранодиориты, включая прочие гранитоиды повышенной основности (126 проб). При расчете учтены все результаты, выполненные методами, позволявшими опре-

делить касситерит. Предполагалось, что если он в пробах не установлен, то его там не было. Главные источники использованных данных перечислены при характеристике Nb и Ta (см. раздел 13.3.2). Здесь перечислены только те горные породы, где установлен касситерит и определено его содержание: пески, песчаники из делювия западного Прикамья (Воронов, 1999); россыпи Северо-Востока СССР (Патык-Кара и др., 1990); четвертичные глинистые отложения севера Западной Сибири (Шумилова, 1971); граниты и гранодиориты СССР (Ляхович, 1967; Недашковский, 1982; Недашковский и др., 1969; Сабельников, 1989; Хрусталеv, 1990); сиениты (включая прочие щелочные гранитоиды) Кольского полуострова (Батиева, Бельков, 1985; Бельков и др., 1988); парагнейсы и парасланцы СССР (Ляхович, 1966); гранито-гнейсы СССР (Ляхович, 1966, 1967). Большинство приводимых ниже цифр средневзвешенные или средние арифметические, некоторые рассчитаны сложнее. Рассмотрим два примера. Первый – пески и песчаники (включая породы, близкие к ним по литологическому составу). Касситерит обнаружен в трех пробах. В двух пробах делювия (Воронов, 1999) валовое содержание Sn неизвестно. Касситерит ( $1.7 \cdot 10^{-4}$  и  $1 \cdot 10^{-4} \%$ ) может обеспечить содержание Sn в пробах меньше среднего. Вероятно, валовое содержание Sn здесь соизмеримо со средним, поэтому приведенные выше цифры учтены без поправок. В сводной пробе супесей из россыпей (Патык-Кара и др., 1990) содержание Sn (0.05%), характерное для околорудных ореолов. Учет содержания касситерита, установленного в этой пробе без поправок, был бы допустим, если бы масса подобных ореолов составляла 0.1% от общей массы верхней части континентальной коры. Из опыта поисков оловянных месторождений следует, что она значительно меньше, поэтому содержание касситерита в данной пробе учтено с условно принятым коэффициентом 0.01. Второй пример – среднее содержание касситерита в парагнейсах и парасланцах. Есть данные по шести объектам: Среднему Уралу, Кольскому полуострову, Туве (Ляхович, 1966), Приполярному Уралу (Вигорова, Покровский, 1973), Украинскому щиту (Носырев и др., 1986), Предкарельскому комплексу Балтийского щита (Вулканизм..., 1987). В параметаморфитах первых двух объектов установлен касситерит ( $5 \cdot 10^{-7}$  и  $1.5 \cdot 10^{-5} \%$ ). Количество проб, изученных в четырех объектах, неизвестно, поэтому учтены количество объектов и возможности исследователей. У В.В. Ляховича (1966) максимальный опыт изучения акцессорных минералов, у В.Г. Вигоровой и П.В. Покровского (1973) – более совершенная методика, поэтому изученные ими четыре объекта учтены с коэффициентами 1, остальные два с коэффициентами 0.6. Средние содержания Sn в касситерите (77%) определены приблизительно по данным справочников.

По расчету, в верхней части континентальной коры в касситерите сконцентрировано 0.66% масс Sn (табл. 5.11). В гранитно-гнейсовом слое эта доля несколько больше, а в осадочном она минимальна. Среди континентальных пород максимальной концентрацией Sn в касситерите характеризуются граниты, на втором месте гранодиориты, третье принадлежит парасланцам. В гранитах также заметную роль играют минералы ряда колумбит–танталит. Если разделить разновидности, составляющие ряд колумбит–танталит, на крайние члены, то данные будут следующие: среднее со-

Доли масс Sn, сконцентрированные в касситерите

| Горные породы                      | Содержание касситерита, % | Доли массы Sn, сконцентрированные в касситерите* |
|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------|
| Пески и песчаники                  | $8 \cdot 10^{-7}$         | 0.22                                             |
| Глины и глинистые сланцы           | $5 \cdot 10^{-7}$         | 0.11                                             |
| Граниты                            | $1.5 \cdot 10^{-5}$       | 3.85                                             |
| Гранодиориты                       | $4 \cdot 10^{-6}$         | 1.4                                              |
| Сиениты                            | $3.5 \cdot 10^{-6}$       | 0.67                                             |
| Парагнейсы и парасланцы            | $5 \cdot 10^{-6}$         | 0.84                                             |
| Гранито-гнейсы                     | $3.2 \cdot 10^{-8}$       | 0.01                                             |
| Осадочный слой                     | $4 \cdot 10^{-7}$         | 0.11                                             |
| Гранитно-гнейсовый слой            | $3.8 \cdot 10^{-6}$       | 0.77                                             |
| Верхняя часть континентальной коры | $3 \cdot 10^{-6}$         | 0.66                                             |

\* % от долей масс Sn, находящихся в данном объекте (горной породе, слое или в верхней части континентальной коры).

держание в гранитах колумбита  $8 \cdot 10^{-5}$  %, танталита –  $3 \cdot 10^{-5}$  %. Среднее содержание Sn в колумбите 0.32%, в танталите – 0.37%. Доли массы Sn (от всей его массы в гранитах) в колумбите 0.085%, в танталите – 0.037%. Отметим, что исходные данные о содержании акцессорных минералов в горных породах получены микрообогатительными методами. Учтены лишь частицы крупностью 50–250 или  $> 30$ –50 мкм. Таким образом, исходные данные соответствуют минимально возможным содержаниям касситерита. Приведенные доли масс Sn, сконцентрированные в его максиминералах, минимально возможные.

#### 5.4.4. Выводы

Среднее содержание Sn в верхней части континентальной коры  $3.5 \cdot 10^{-4}$  %. Главные носители Sn метаморфические породы, в которых находится 71.29% масс этого элемента. В верхней части континентальной коры в касситерите сконцентрировано 0.66% масс Sn. Эта цифра минимально возможная. Максимальная концентрация Sn в касситерите установлена в гранитах (3.85% всех масс Sn).

#### 5.5. СВИНЕЦ

##### 5.5.1. Среднее содержание и распределение масс Pb в верхней части континентальной коры

Вариации содержаний Pb в большинстве горных пород изучены недостаточно. Относительно хорошо изучены только магматические породы гранитно-гнейсового слоя. Средние содержания Pb в них (см. табл. 5.1) условно приняты соответствующим тем, которые приведены Л.Н. Овчинниковым (1990) для магматических пород всей земной коры, осталь-

ные данные авторские, рассчитанные по результатам анализов, заимствованным из литературы (Григорьев, 2002). Приводимые здесь данные значительно подробнее литературных. Наибольшим средним содержанием Pb характеризуются кислые вулканиты, продукты их метаморфизма, парагнейсы и парасланцы, но зависимость среднего содержания Pb от состава горных пород относительно слабая. В наиболее распространенных горных породах средние коэффициенты концентрации 0.35–1.8. Главные носители Pb – метаморфические породы, в которых сосредоточено 69.79% его массы. Среднее содержание Pb в верхней части континентальной коры 0.00171%. Эта цифра практически соответствует тем, которые приводились в последние годы другими исследователями, – 0.0017–0.0018% (Rudnick, Gao, 2004). Распределение Pb в верхней части континентальной коры приближается к требованиям геохимического баланса, но его среднее содержание в континентальных осадочных породах 0.0012% несколько меньше того, которое должно быть в продуктах выветривания гранитно-гнейсового слоя современного состава (0.0015% по определению изотопно-алюминиевым методом).

### **5.5.2. Средние доли масс Pb, сконцентрированные в свинцовых минералах**

До XX в. считали, что малые и редкие химические элементы сконцентрированы в собственных минералах, затем последовало представление о «рассеянии» их в породообразующих. Е.С. Ларсен с коллегами (Larsen et al., 1952) исследовали кварцевый диорит из Южной Калифорнии и, как казалось, подтвердили последнее представление. Это повлияло на последующие исследования. При определении минеральных балансов Pb в горных породах (Рабинович, Баскова, 1959; Таусон, 1961; Воронов, Селиванова, 1971; Козлов, 1972; Бушляков, Соболев, 1976; Сазонов, 1986) свинцовые минералы не учитывали, даже при их наличии. Суммы долей масс Pb, сосредоточенные в учтенных минералах, в большинстве случаев близки к 100%, реже – 49–80. Автор определил минеральный баланс Pb в четырех пробах скарнов железорудных и медно-рудных месторождений. При пониженном валовом содержании Pb в скарнах (0.0005%) свинцовые минералы обнаружены не были. При околоскарновом валовом его содержании (0.0025 и 0.0036%) обнаружен галенит. В нем оказалось сконцентрировано соответственно 24 и 36% Pb (Григорьев, 1999). Вопрос о роли свинцовых минералов как носителей Pb в распространенных горных породах оставался открытым. Его решение было возможно на основе данных о содержании акцессорных минералов в горных породах.

Собрав часть таких данных, автор определил приблизительно среднее содержание галенита в верхней части земной коры –  $2.4 \cdot 10^{-5}$  % (Григорьев, 1999). Это соответствует доле масс Pb, сконцентрированной в галените, – 1.6%. Затем был обработан более обширный материал по континентальным горным породам. Ниже приведены результаты этого исследования. Средние содержания свинцовых минералов в горных породах рассчи-



таны по литературным данным. Это результаты количественных минералогических анализов более чем 2160 проб горных пород. Большинство использованных данных выражено численно, некоторые – как «сл.» или «р. зн.». Такие обозначения приравнены половине чувствительности использованных методов минералогического анализа. Количество изученных проб: пески и песчаники > 990, граниты – 379, сиениты – 210, гранодиориты и прочие гранитоиды повышенной основности – 126, базиты > 83, ультрабазиты – 82, метабазиты – 74, основные вулканы – 55, метапесчаники > 49, парагнейсы и парасланцы > 35. Количество проанализированных проб каждой из не отмеченных выше горных пород неизвестно или меньше 30. Большинство источников исходных данных приведено при характеристике Си (см. раздел 9.1.). Дополнительные первоисточники отмечены ниже.

**Песчаники** Приверхоянского прогиба и Азербайджана (Справочное руководство..., 1958). **Вулканы осадочного слоя:** кайнозойские трахипариты, дациты, трахиандезиты, трахидациты, трахибазальты, трахидиабазы Северо-Востока России (Ипатьева, Соловьев, 1982). **Гранитоиды** Дальнего Востока и Сибири (Винокурова и др., 1982; Недашковский, 1982). **Базиты.** Габбро Дальнего Востока (Недашковский, 1982); докембрийские габброиды Воронежского кристаллического массива (Чернышов, Плаксенко 1982). **Сиениты СССР** (Тихоненкова, 1982). **Ультрабазиты.** Докембрийские дуниты и перидотиты Воронежского кристаллического массива (Чернышов, Плаксенко, 1971). **Метапесчаник** из Тувы (Ляхович, 1966). **Парагнейсы и парасланцы** Кольского полуострова, Урала и Тувы (Ляхович, 1966). **Гранито-гнейсы** Кольского полуострова, Урала (Ляхович, 1966), Дальнего Востока (Недашковский, 1982). Автору не удалось найти результатов количественных определений содержания свинцовых минералов в глинах и глинистых сланцах, кремнистых породах, эвапоритах, метакarbonатных и железистых породах.

Согласно полученным данным, в верхней части континентальной коры в свинцовых минералах сконцентрировано 1.02% массы Pb. Из них 0.97% в галените (табл. 5.12). Последняя цифра несколько меньше полученной раньше для верхней части всей земной коры (1.6% массы Pb). В осадочном слое роль свинцовых минералов больше, чем в гранитно-гнейсовом, но в осадочных породах она минимальна. Зато максимальной ролью свинцовых минералов характеризуются вулканы осадочного слоя (табл. 5.13), причем доли масс Pb, сконцентрированные в свинцовых минералах, последовательно уменьшаются от кислых вулканитов к основным. В гранитно-гнейсовом слое ситуация похожая: роль свинцовых минералов максимальна в магматических породах (табл. 5.14) и минимальна – в параметаморфических (табл. 5.15). Среди ортометаморфических пород максимальной ролью свинцовых минералов характеризуются метариолиты. Везде галенит – главный свинцовый минерал. Использованные исходные данные получены микрообогащительными методами. При наиболее распространенных их вариантах учитывают частицы акцессорных минералов крупностью 50–250 или > 30–50 мкм. Таким образом, исходные данные соответствуют не истинным, а минимально возможным

Таблица 5.12

**Роль свинцовых минералов как носителей Pb в верхней части континентальной коры**

| Минералы          | Содержание Pb в минералах, % | Осадочный слой       |                  | Гранитно-гнейсовый слой |                  | Верхняя часть континентальной коры |                  |
|-------------------|------------------------------|----------------------|------------------|-------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
|                   |                              | Содержание минералов | Доли массы Pb, % | Содержание минералов    | Доли массы Pb, % | Содержание минералов               | Доли массы Pb, % |
| Джемсонит         | 40.4                         | Не опр.              | Не опр.          | $3.7 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01           | $2.8 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01           |
| Вульфенит         | 50.4                         | Не опр.              | Не опр.          | $5.2 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01           | $4 \cdot 10^{-9}$                  | < 0.01           |
| Буланжерит        | 55                           | Не опр.              | Не опр.          | $5.2 \cdot 10^{-10}$    | < 0.01           | $4 \cdot 10^{-10}$                 | < 0.01           |
| Англезит          | 68.3                         | Не опр.              | Не опр.          | $4.3 \cdot 10^{-7}$     | 0.02             | $3.3 \cdot 10^{-7}$                | 0.01             |
| Церуссит          | 76                           | $1 \cdot 10^{-6}$    | 0.063            | $5.2 \cdot 10^{-7}$     | 0.02             | $6.3 \cdot 10^{-7}$                | 0.03             |
| Галенит           | 86.6                         | $1.7 \cdot 10^{-5}$  | 1.23             | $1.9 \cdot 10^{-5}$     | 0.87             | $1.9 \cdot 10^{-5}$                | 0.97             |
| Свинец самородный | 99.7                         | $1.1 \cdot 10^{-7}$  | 0.009            | $2 \cdot 10^{-7}$       | 0.01             | $1.8 \cdot 10^{-7}$                | 0.01             |
| Сумма             |                              |                      | 1.302            |                         | 0.92             |                                    | 1.02             |

Таблица 5.13

**Доли массы Pb (%), сконцентрированные в свинцовых минералах осадочного слоя континентальной коры**

| Минералы          | Осадочные породы           |                            | Вулканогенные породы      |                            |                          |                            |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
|                   | Пески и песчаники          | В целом                    | Кислые                    | Средние                    | Основные                 | В целом                    |
| Церуссит          | Не опр.                    | Не опр.                    | $1.65 (5 \cdot 10^{-5})$  | Не опр.                    | $0.21 (3 \cdot 10^{-6})$ | $0.41 (8 \cdot 10^{-6})$   |
| Галенит           | $0.04 (2.6 \cdot 10^{-7})$ | $0.01 (1.8 \cdot 10^{-7})$ | 7.53 (0.0002)             | $7.22 (1.5 \cdot 10^{-4})$ | $5.51 (7 \cdot 10^{-5})$ | $6.35 (1.1 \cdot 10^{-4})$ |
| Свинец самородный | Не опр.                    | Не опр.                    | $0.087 (2 \cdot 10^{-6})$ | $0.06 (1 \cdot 10^{-6})$   | $0.03 (3 \cdot 10^{-7})$ | $0.05 (7.2 \cdot 10^{-7})$ |
| Сумма             | $0.04 (7 \cdot 10^{-7})$   | $0.01 (1.8 \cdot 10^{-7})$ | 9.267                     | 7.28                       | 5.75                     | 6.81                       |

Примечание. Здесь и в табл. 5.14, 5.15 в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 5.14

**Доли массы Pb (%), сконцентрированные в свинцовых минералах в магматических породах гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы          | Граниты                      | Гранодиориты                 | Базиты                   | Сиениты                   | Ультрабазиты               | Магматические породы         |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Вульфенит         | < 0.01 ( $4 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $2 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.                  | Не опр.                   | Не опр.                    | < 0.01 ( $3 \cdot 10^{-8}$ ) |
| Буланжерит        | < 0.01 ( $5 \cdot 10^{-9}$ ) | Не опр.                      | Не опр.                  | Не опр.                   | Не опр.                    | < 0.01 ( $3 \cdot 10^{-9}$ ) |
| Англезит          | $0.13 (3.6 \cdot 10^{-6})$   | $0.05 (1 \cdot 10^{-6})$     | Не опр.                  | Не опр.                   | Не опр.                    | $0.11 (2.5 \cdot 10^{-6})$   |
| Церуссит          | $0.2 (5 \cdot 10^{-6})$      | Не опр.                      | Не опр.                  | Не опр.                   | Не опр.                    | $0.14 (3 \cdot 10^{-6})$     |
| Галенит           | $1.05 (2.3 \cdot 10^{-5})$   | $1.16 (2 \cdot 10^{-4})$     | $0.87 (6 \cdot 10^{-6})$ | $1.8 (2.5 \cdot 10^{-5})$ | $6.78 (3.6 \cdot 10^{-6})$ | $3.57 (6.6 \cdot 10^{-5})$   |
| Свинец самородный | $0.01 (1.5 \cdot 10^{-7})$   | $0.05 (7 \cdot 10^{-7})$     | Не опр.                  | $0.17 (2 \cdot 10^{-6})$  | Не опр.                    | $0.02 (2.8 \cdot 10^{-7})$   |
| Сумма             | 1.39                         | 1.26                         | 0.87                     | 1.97                      | 6.78                       | 3.84                         |

Таблица 5.15

**Доли массы Pb (%), сконцентрированные в свинцовых минералах  
в метаморфических породах**

| Горные породы              | Джемсонит                    | Галенит                        | Свинец                       | Сумма  |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------|
| Метапесчаники              | Не опр.                      | 0.038 ( $8 \cdot 10^{-7}$ )    | Не опр.                      | 0.038  |
| Парасланцы                 | Не опр.                      | 0.22 ( $5 \cdot 10^{-6}$ )     | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-7}$ )   | 0.23   |
| Параметаморфиты<br>в целом | Не опр.                      | 0.19 ( $4.4 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.01 ( $2.6 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.2    |
| Гранито-гнейсы             | Не опр.                      | 0.68 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.01 ( $1 \cdot 10^{-7}$ )   | 0.69   |
| Метариолиты                | Не опр.                      | 2.79 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                      | 2.79   |
| Метаандезиты               | Не опр.                      | < 0.01 ( $1.3 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.                      | < 0.01 |
| Метабазиты                 | 0.045 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )  | 0.007 ( $7 \cdot 10^{-8}$ )    | Не опр.                      | 0.052  |
| Ортометаморфиты<br>в целом | < 0.01 ( $1 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.72 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )   | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.72   |

значениям содержания свинцовых минералов. Исключения – вулканиты и ультрабазиты, в них роль свинцовых минералов, возможно, несколько преувеличена.

### 5.5.3. Выводы

Среднее содержание Pb в верхней части континентальной коры  $1.71 \cdot 10^{-3} \%$ . Наибольшим средним содержанием Pb характеризуются кислые вулканиты, продукты их метаморфизма, парагнейсы и парасланцы. Главные носители Pb метаморфические породы, в которых сосредоточено 69.79% его массы. В верхней части континентальной коры в свинцовых минералах сконцентрировано 1.02% масс Pb, в том числе, %: в галените – 0.97, церусите – 0.03, англезите – 0.01, свинце самородном – 0.01.

## Глава 6

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ АЗОТА В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

---

#### 6.1. АЗОТ

##### 6.1.1. О распределении N в верхней части континентальной коры

Вариации содержания N в осадочных и магматических породах изучены недостаточно, в других горных породах практически не изучены, поэтому данные, приводимые в табл. 6.1, основаны в значительной мере на предположениях автора. Они соответствуют данным, опубликованным ранее (Григорьев, 2002). Полученная автором величина среднего содержания N в верхней части континентальной коры – 0.0106% – близка к величине 0.0083%, приводившейся в последние годы другими авторами (Rudnick, Gao, 2004). Согласно имеющимся данным и предположениям, максимальным средним содержанием N характеризуются глинистые породы, в них же находится больше половины его массы. Известно больше 40 минералов N, а также большое количество органических соединений с его содержанием > 0.2% (минимальное для максиминералов). Но данных, допускающих хотя бы приблизительную оценку их средней роли как носителей N в горных породах, пока нет.

#### 6.2. ФОСФОР

##### 6.2.1. Среднее содержание и распределение масс P в верхней части континентальной коры

При первых расчетах (Григорьев, 2003б) средние содержания P в большинстве горных пород были приняты по А.Б. Ронову с соавторами (1990) с небольшими поправками. Средние содержания P в гранитах и гранодиоритах были заимствованы у А.А. Беуса (1981), а в гранито-гнейсах – у А. Польдерваарта (цит. по: Маккелви, 1977). Авторскими были средние содержания P в метаандезитах в слоях и верхней части континентальной коры в целом. В табл. 6.1 приведены цифры, исправленные (Григорьев, 2007) с учетом дополнительных литературных данных. Важнейшие первоисточники (Глухан, Серых, 2000, 2001; Кузнецов и др., 2006; Макрыгина и др., 2000; Маслов и др., 2004; Резницкий и др., 2004; Сафронов, 2005; Condie et al., 1991, 2001; Di Leo et al., 2002; Gallet et al., 1998; Huber et al., 2001; Yang et al., 1998). Приводимая здесь величина среднего содержания

Таблица 6.1  
Среднее содержание и распределение масс N, P, As, Sb, Bi (%) в ассоциации горных пород верхней части континентальной коры

| Горные породы                             | Масса пород  | Среднее содержание |                    |                            |                            |                            | Доли масс    |               |              |              |              |
|-------------------------------------------|--------------|--------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
|                                           |              | N                  | P                  | As                         | Sb                         | Bi                         | N            | P             | As           | Sb           | Bi           |
| Пески и песчаники                         | 5.11         | 0.012              | 0.062              | 7.2·10 <sup>-4</sup>       | 6.3·10 <sup>-5*</sup>      | 2·10 <sup>-5</sup>         | 5.79         | 4.62          | 6.57         | 3.97         | 3.52         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4         | 0.058              | 0.079              | 9.3·10 <sup>-4</sup>       | 1.3·10 <sup>-4</sup>       | 3.8·10 <sup>-5</sup>       | 56.91        | 11.99         | 17.27        | 16.69        | 13.63        |
| Карбонатные породы                        | 3.85         | 0.039              | 0.048              | 4.4·10 <sup>-4</sup>       | 2.5·10 <sup>-5</sup>       | 5·10 <sup>-6</sup>         | 14.17        | 2.7           | 3.03         | 1.19         | 0.66         |
| Кремнистые породы                         | 0.33         | 0.04*              | 0.066              | 4.4·10 <sup>-4</sup>       | He опр.                    | He опр.                    | 1.25*        | 0.32          | 0.26         | He опр.      | He опр.      |
| Эвапориты                                 | 0.26         | 0.06*              | 4·10 <sup>-4</sup> | 4·10 <sup>-4</sup>         | He опр.                    | 3·10 <sup>-6</sup>         | 1.47*        | <0.01         | 0.19         | He опр.      | 0.03         |
| Кислые вулканы                            | 0.44         | 0.003*             | 0.044              | 4.3·10 <sup>-4</sup>       | 5·10 <sup>-5*</sup>        | 1.4·10 <sup>-5</sup>       | 0.13*        | 0.28          | 0.34         | 0.27         | 0.21         |
| Средние вулканы                           | 1.13         | 0.0032             | 0.096              | 2.5·10 <sup>-4</sup>       | 7·10 <sup>-5</sup>         | 7·10 <sup>-6</sup>         | 0.34         | 1.58          | 0.5          | 0.98         | 0.27         |
| Основные вулканы                          | 2.11         | 0.0036             | 0.109              | 2·10 <sup>-4</sup>         | 1.1·10 <sup>-4</sup>       | 5·10 <sup>-6</sup>         | 0.72         | 3.36          | 0.75         | 2.87         | 0.36         |
| Граниты                                   | 8.21         | 0.0022             | 0.06               | 1.6·10 <sup>-4</sup>       | 3·10 <sup>-5</sup>         | 2·10 <sup>-5</sup>         | 1.7          | 7.19          | 2.35         | 3.04         | 5.66         |
| Гранодиориты                              | 3.38         | 0.002              | 0.11               | 1.8·10 <sup>-4</sup>       | 5·10 <sup>-5</sup>         | 1.1·10 <sup>-5</sup>       | 0.64         | 5.43          | 1.09         | 2.09         | 1.28         |
| Базиты                                    | 1.5          | 0.0019             | 0.089              | 2·10 <sup>-4</sup>         | 1.1·10 <sup>-4</sup>       | 5.2·10 <sup>-6</sup>       | 0.27         | 1.95          | 0.54         | 2.04         | 0.27         |
| Сyenиты                                   | 0.05         | 0.003              | 0.087              | 1.4·10 <sup>-4</sup>       | 2.2·10 <sup>-5</sup>       | 1.8·10 <sup>-5</sup>       | 0.01         | 0.06          | 0.01         | 0.01         | 0.03         |
| Ультрабазиты                              | 0.05         | 0.0007             | 0.035              | 1.3·10 <sup>-4</sup>       | 9·10 <sup>-5</sup>         | 9·10 <sup>-7</sup>         | <0.01        | 0.03          | 0.01         | 0.06         | <0.01        |
| Металесчанники                            | 2.92         | 0.002*             | 0.057              | 7.6·10 <sup>-4</sup>       | 7·10 <sup>-5*</sup>        | 3.1·10 <sup>-5</sup>       | 0.55*        | 2.43          | 3.96         | 2.52         | 3.12         |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56        | 0.002*             | 0.054              | 9.5·10 <sup>-4</sup>       | 1.3·10 <sup>-4</sup>       | 5.8·10 <sup>-5</sup>       | 5.77*        | 24.09         | 51.84        | 49.05        | 61.12        |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13         | 0/002*             | 0.13               | 4·10 <sup>-4*</sup>        | 2.5·10 <sup>-5*</sup>      | 1.3·10 <sup>-5</sup>       | 0.21*        | 2.15          | 0.81         | 0.35         | 0.51         |
| Железистые породы                         | 0.38         | 0.002*             | 0.047              | 7.5·10 <sup>-4</sup>       | He опр.                    | He опр.                    | 0.072*       | 0.26          | 0.51         | He опр.      | He опр.      |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21        | 0.0037             | 0.087              | 1.4·10 <sup>-4</sup>       | 3.3·10 <sup>-5</sup>       | 1·10 <sup>-5</sup>         | 8.1          | 29.48         | 5.8          | 9.46         | 8            |
| Метариолиты                               | 0.66         | 0/003*             | 0.048              | 4·10 <sup>-4*</sup>        | 5·10 <sup>-5</sup>         | 1.5·10 <sup>-5</sup>       | 0.19*        | 0.46          | 0.47         | 0.41         | 0.34         |
| Метандезиты                               | 1.03         | 0.003*             | 0.074              | 7·10 <sup>-4</sup>         | 7·10 <sup>-5*</sup>        | 1.5·10 <sup>-5</sup>       | 0.29*        | 1.11          | 1.29         | 0.89         | 0.53         |
| Метабазиты                                | 3.29         | 0.003*             | 0.011              | 3.3·10 <sup>-4</sup>       | 1·10 <sup>-4*</sup>        | 2·10 <sup>-6</sup>         | 0.93*        | 0.53          | 1.94         | 4.06         | 0.23         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>   | <b>0.0106</b>      | <b>0.069</b>       | <b>5.6·10<sup>-4</sup></b> | <b>8.1·10<sup>-5</sup></b> | <b>2.9·10<sup>-5</sup></b> | <b>99.51</b> | <b>100.02</b> | <b>99.53</b> | <b>99.95</b> | <b>99.77</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95        | 0.042              | 0.067              | 7.7·10 <sup>-4</sup>       | 8.9·10 <sup>-5</sup>       | 2.6·10 <sup>-5</sup>       | 79.59        | 19.63         | 27.32        | 21.85        | 17.84        |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68         | 0.0034             | 0.097              | 2.4·10 <sup>-4</sup>       | 9.1·10 <sup>-5</sup>       | 6.7·10 <sup>-6</sup>       | 1.19         | 5.22          | 1.59         | 4.12         | 0.84         |
| <b>Осадочный слой</b>                     | <b>23.63</b> | <b>0.036</b>       | <b>0.069</b>       | <b>6.8·10<sup>-4</sup></b> | <b>8.9·10<sup>-5</sup></b> | <b>2.3·10<sup>-5</sup></b> | <b>80.78</b> | <b>24.85</b>  | <b>28.91</b> | <b>25.97</b> | <b>18.68</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19        | 0.0021             | 0.076              | 1.7·10 <sup>-4</sup>       | 4.4·10 <sup>-5</sup>       | 1.6·10 <sup>-5</sup>       | 2.62         | 14.66         | 4            | 7.24         | 7.24         |
| Параметаморфиты                           | 34.99        | 0.002*             | 0.057              | 9.2·10 <sup>-4</sup>       | 1.2·10 <sup>-4</sup>       | 5.4·10 <sup>-5</sup>       | 6.6*         | 28.93         | 57.12        | 51.92        | 64.75        |
| Ортометаморфиты                           | 28.19        | 0.0036             | 0.076              | 1.9·10 <sup>-4</sup>       | 4.3·10 <sup>-5</sup>       | 9.4·10 <sup>-6*</sup>      | 9.51         | 31.58         | 9.5          | 14.82        | 9.1          |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой</b>            | <b>76.37</b> | <b>0.0026</b>      | <b>0.067</b>       | <b>5.2·10<sup>-4</sup></b> | <b>7.8·10<sup>-5</sup></b> | <b>3.1·10<sup>-5</sup></b> | <b>18.73</b> | <b>75.17</b>  | <b>70.62</b> | <b>73.98</b> | <b>81.09</b> |

\* Величины, вычисленные по единичным определениям или предполагаемые при отсутствии исходных данных.

Р в верхней части континентальной коры 0.069 % находится в пределах величин 0.00–0.17% (0.00–0.31%  $P_2O_5$ ), публиковавшихся в последние 50 лет другими исследователями (Rudnick, Gao, 2004). Максимальное среднее содержание Р установлено в метаморфических породах существенно карбонатного состава, затем следуют магматические породы среднего и основного состава. Но средние величины коэффициентов концентрации Р здесь минимальные (не превышают 1.8), т. е. среднее содержание Р мало зависит от состава горных пород, поэтому распределение Р в верхней части континентальной коры почти пропорционально массам главных горных пород. Согласно имеющимся данным, Р может быть отнесен к «слабоизбыточным элементам». Его среднее содержание в осадочных породах континентальной коры (0.067%) немного выше соответствующего полному набору продуктов выветривания гранитно-гнейсового слоя современного состава – 0.059% (расчет изоалюминиевым методом). Главные носители Р метаморфические породы (табл. 6.1).

### 6.2.2. Доли масс Р, сконцентрированные в фосфатах

Автором была впервые определена минимально возможная роль фосфатов как носителей Р в горных породах и верхней части континентальной коры в целом. В земной коре главные химические элементы почти полностью сконцентрированы в собственных минералах, основная же масса редких элементов рассеяна в породообразующих минералах. Естественно предположить, что у малых химических элементов ситуация промежуточная. До настоящего времени справедливость этого предположения была подтверждена только данными автора о минеральных балансах Р в трех пробах оклорудных метасоматитов (Григорьев, 1999). Но этого недостаточно для определения роли фосфатов как носителей Р в распространенных горных породах. Для решения этого вопроса использованы опубликованные в литературе результаты более чем 3330 количественных и полуквантитативных определений содержания фосфатов в важнейших горных породах. Используются преимущественно результаты минералогических анализов проб горных пород, выполненных микрообогачительными методами. Кроме того, учтены результаты более 500 определений содержания апатита в континентальных породах по подсчетам в шлифах. Наиболее изучены вариации содержания фосфатов (в скобках количество проб) в песках и песчаниках осадочного слоя (> 1108), гранитах (> 692), сиенитах (> 336), гранодиоритах, включая прочие гранитоиды повышенной основности (> 322), глинах и суглинках (> 118), парагнейсах и других парасланцах (> 115), гранито-гнейсах (> 114), метабазитах (> 107), базитах (> 97), ультрабазитах (> 96), метапесчаниках (> 55). При расчетах с помощью коэффициентов учтено разное качество опубликованных данных. Некоторые из них – это данные анализов отдельных проб, другие – средние результаты по десяткам и даже сотням проб и образцов. Одни данные представляют главные, другие – второстепенные разновидности горных пород. Ниже перечислены главные источники данных.

*Пески, песчаники* Русской платформы, Северного Приуралья и Южного Урала от четвертичных до нижнерифейских (Ильин, Сыромятина, 1972; Карякин, 1951; Кузнецов, 1992; Ронов и др., 1963; Сергеева, 1989; Челышев и др., 1965), Восточной Камчатки (Малиновский, 1990), палеозойские Центрального Таджикистана (Бабкин, 1986), аркозовые песчаники Приверхоянского прогиба и аркозовые алевроиты Армении (Справочное руководство..., 1958).

*Глины, сланцы* Русской платформы от триасовых до плиоценовых (Кузнецов, 1992; Саркисян, 1949; Челышев и др., 1965), Западной Сибири юрские и четвертичные (Плуман, 1975, Шумилова, 1971).

*Карбонатные породы* – верхнепермские известняки и мергели Русской платформы (Саркисян, 1949).

*Кремнистые породы* – третичные Украины (Карякин, 1954).

*Кислые вулканиды*: франские перлиты и липариты Северного Урала (Язева, 1973), риолиты, трахилипариты северо-востока Сибири (Ипатьева, Соловьев, 1982; Петров, 1945), кавказские липариты, липарит-дацитовые порфиры, дациты, трахилипариты (Држбашян, 1965; Ляхович, 1963; Ляхович, Чирвинская, 1961; Мнацаканян, 1965).

*Средние вулканиды*: дациты, трахиандезиты, трахидациты северо-востока Сибири (Ипатьева, Соловьев, 1982), кавказские андезиты и андезитовые порфиры (Држбашян, 1965; Ляхович, 1963; Мнацаканян, 1965).

*Основные вулканиды*: траппы Сибири (Наумов, Гурин, 1982), трахибазальты, трахидиабазы северо-востока Сибири (Ипатьева, Соловьев, 1982), кавказские базальты, долериты, базальтовые порфиры (Држбашян, 1965, Ляхович, 1963, Мнацаканян, 1965).

*Граниты и гранодиориты* СССР (Бартикян, 1968; Бельков, 1979; Бушляков, Соболев, 1976; Вигорова, Покровский, 1973; Винокурова и др., 1982; Ипатьева, 1976; Ляхович, 1967; Недашковский, 1982; Туровский, Кокарев, 1968); докембрийские Венесуэлы (Kalliokoski, 1965) и Нью-Джерси (Maxey, 1976; Young, 1971).

*Сиениты* СССР (Батиева, Бельков, 1984, 1985; Бельков, 1979; Бельков и др., 1988; Еськова и др., 1964; Зубарев, 1978; Кузнецова, 1976; Леонова, Погиблова, 1961; Поляков, Кот, 1965; Тихоненкова, 1982; Туровский, Кокарев, 1968; Фишман и др., 1968) и Нью-Джерси (Yung, 1971).

*Базиты*: докембрийские габброиды Украинского щита (Чернышов, 1971; Чернышов, Плаксенко, 1982), уральские габброиды, габбро-диабазы, диабазы и порфириты (Соболев, 1965, 1968; Фишман и др., 1968), габброиды Дальнего Востока (Недашковский, 1982), габбро Северной Калифорнии (Lipman, 1963).

*Ультрабазиты*: докембрийские дуниты, перидотиты, серпентиниты Украинского щита (Чернышов, 1971; Чернышов, Плаксенко, 1982), уральские дуниты, пироксениты и перидотиты (Борисенко, Сердобова, 1965, Соболев, 1968, Фишман и др., 1968), дуниты Южной Якутии (Разин и др., 1965).

*Метапесчаники*: докембрийские метапесчаники, конгломераты, кварциты Урала (Фишман и др., 1966; Вигорова, Покровский, 1973; Крылова и др., 1986), Украинского щита (Носырев др, 1986), метапесчаники Киргизии (Кокарев и др., 1986) и Тувы (Ляхович, 1966), кремнистые сланцы и метаграувакки Калифорнии (Ernst, 1965).

*Парагнейсы:* парасланцы и гнейсы Балтийского щита (Ляхович, 1966; Вулканизм..., 1987), докембрийские кристаллические сланцы Украинского щита (Железисто-кремнистая..., 1974; Щербаков, 1975; Носырев и др., 1986), докембрийские парасланцы Урала и Тувы (Старков, 1963; Ляхович, 1966; Вигорова, Покровский, 1973), докембрийские парасланцы и парагнейсы Венесуэлы (Kalliokoski, 1965), Монтаны и Вайоминга (Butler, 1966), Нью-Джерси (Young, 1971), рифейские парасланцы Рудных гор (Ермолаев и др., 1976).

*Метакарбонатные породы* – кальцифиры Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Железистые породы* – докембрийские Южного Урала (Ермаков, 1959).

*Гранито-гнейсы* Кольского полуострова (Бельков и др., 1988; Ляхович, 1966), Украинского щита (Носырев и др., 1986), Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984), Урала и юго-восточной Тувы (Ляхович, 1967), Дальнего Востока (Недашковский, 1982), Венесуэлы (Kovisars, 1971).

*Метариолиты:* кварцевые амфиболиты, метадациты и метаморфизованные кварцевые порфиры Урала (Фишман и др., 1966, 1968; Гурбанов и др., 1999).

*Метаяндезиты:* протерозойские безрудные амфиболиты вольфрамового месторождения на Северном Кавказе (Кременецкий, Овчинников, 1986), часть докембрийских амфиболитов Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Метабазиты:* докембрийские габбро-амфиболиты и амфиболиты Центрального Памира (Акрамов, Дусматов, 1986), пироксен-плагиоклазовые ортогнейсы, аподиабазовые и апогнейсовые мигматиты Украинского щита (Железисто-кремнистая..., 1974; Трощенко, 1975), ортоамфиболит Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984), докембрийские амфиболиты Монтаны и Вайоминга (Buttler, 1966), метабазальты Калифорнии (Ernst, 1965), амфиболовые сланцы штата Нью-Йорк (Blank, 1972), уральские метадиабазы, метабазальты, метагаббро, аподиабазовые амфиболиты глаукофан-биотитовые и прочие ортосланцы основного состава (Фишман и др., 1966; Крылова и др., 1986; Гурбанов, Бубнов, 1999). Средние содержания Р в фосфатах определены приблизительно по результатам анализов этих минералов, заимствованным в основном из справочников.

Согласно полученным данным, в верхней части континентальной коры в фосфатах сконцентрировано около 1/3 масс Р (табл. 6.2). В осадочном слое роль фосфатов как носителей Р минимальна, но в гранитно-гнейсовом слое в фосфатах находится почти половина массы Р (см. табл. 6.2). В осадочных породах главные концентраторы Р карбонат-апатит и учтенные с ним совместно другие экзогенные минералы ряда апатита. Роль их в целом минимальная. Исключение – пески и песчаники, где в фосфатах сконцентрировано больше половины массы Р (табл. 6.3). В вулканогенных породах главный концентратор Р апатит (табл. 6.4), но роль его как носителя Р минимальная. Во всех горных породах гранит-



Таблица 6.2

**Роль фосфатов как носителей Р в верхней части континентальной коры**

| Минералы        | Содержание Р в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|                 |                             | Содержание минералов, % | Доли массы Р, % | Содержание минералов, % | Доли массы Р, % | Содержание минералов, %            | Доли массы Р, % |
| Метаторбернит   | 6.2                         | Не опр.                 | Не опр.         | $9.7 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $7.4 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Рабдофан        | 11.3                        | Не опр.                 | Не опр.         | $4.3 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $3.3 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Черчит          | 11.9                        | Не опр.                 | Не опр.         | $4.8 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01          | $3.7 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01          |
| Монацит         | 12.1                        | $3.4 \cdot 10^{-4}$     | 0.06            | 0.0016                  | 0.29            | 0.0013                             | 0.23            |
| Вивианит        | 12.2                        | Не опр.                 | Не опр.         | $1.7 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $1.3 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Ксенотим        | 14.2                        | $1 \cdot 10^{-5}$       | < 0.01          | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.01            | $3.7 \cdot 10^{-5}$                | 0.01            |
| Карбонат-апатит | 15.7                        | 0.035                   | 7.63            | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | 0.0083                             | 1.89            |
| Апатит          | 17.8                        | 0.014                   | 3.46            | 0.16                    | 42.5            | 0.13                               | 33.54           |
| Амблигонит      | 20.7                        | Не опр.                 | Не опр.         | $6.4 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01          | $4.9 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01          |
| Сумма           |                             | 0.049                   | 11.15           | 0.16                    | 42.8            | 0.14                               | 35.67           |

Таблица 6.3

**Доли масс Р (%), сконцентрированные в фосфатах континентальных осадочных пород**

| Минералы        | Пески и песчаники          | Глины и глинистые сланцы     | Кремнистые породы | Осадочные породы в целом     |
|-----------------|----------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Монацит         | 0.29 (0.0015)              | Не опр.                      | Не опр.           | $0.07 (3.8 \cdot 10^{-4})$   |
| Ксенотим        | 0.01 ( $4 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                      | Не опр.           | < 0.01 ( $1 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Карбонат-апатит | 40.5 (0.16)                | < 0.01 ( $1 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.           | 9.61 (0.041)                 |
| Апатит          | 14.1 (0.049)               | 0.5 (0.0022)                 | 1.35 (0.005)      | 3.72 (0.014)                 |
| Сумма           | 54.9 (0.21)                | 0.5 (0.0022)                 | 1.35 (0.005)      | 13.4 (0.055)                 |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – среднее содержание минералов, %.

Таблица 6.4

**Доли масс Р (%), сконцентрированные в фосфатах вулканических пород осадочного слоя континентальной коры**

| Минералы | Кислые                     | Средние     | Основные    | Вулканиды в целом              |
|----------|----------------------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| Монацит  | 0.28 (0.001)               | Не опр.     | Не опр.     | $0.01 (1.2 \cdot 10^{-4})$     |
| Ксенотим | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.     | Не опр.     | < 0.01 ( $3.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Апатит   | 4.45 (0.011)               | 5.56 (0.03) | 1.63 (0.01) | 2.94 (0.016)                   |
| Сумма    | 4.74 (0.012)               | 5.56 (0.03) | 1.63 (0.01) | 2.95 (0.016)                   |

Таблица 6.5

**Доли масс Р (%), сконцентрированные в фосфатах магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы       | Граниты                        | Гранодиориты                   | Сиениты                        | Магматические породы           |
|----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Метаторбернит  | < 0.01 ( $9 \cdot 10^{-8}$ )   | Не опр.                        | Не опр.                        | < 0.01 ( $5.6 \cdot 10^{-8}$ ) |
| Рабдофан       | < 0.01 ( $4 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                        | Не опр.                        | < 0.01 ( $2.5 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Черчит         | < 0.01 ( $4.5 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                        | Не опр.                        | < 0.01 ( $2.8 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Монацит        | 0.87 (0.0043)                  | 0.04 (0.0004)                  | 0.33 (0.0024)                  | 0.45 (0.0028)                  |
| Вивианит       | < 0.01 ( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                        | Не опр.                        | < 0.01 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Ксенотим       | 0.05 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | < 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | < 0.01 ( $2.7 \cdot 10^{-6}$ ) | < 0.01 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Карбонатапатит | < 0.01 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )   | < 0.01 ( $1.2 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                        | < 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Апатит         | 17.8 (0.06)                    | 11.3 (0.07)                    | 22.5 (0.11)                    | 15.9 (0.068)                   |
| Амблигонит     | < 0.01 ( $6 \cdot 10^{-7}$ )   | Не опр.                        | Не опр.                        | < 0.01 ( $3.7 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Сумма          | 18.72 (0.0645)                 | 11.34 (0.07)                   | 22.83 (0.11)                   | 16.35 (0.071)                  |

Примечание. В базитах и ультрабазитах обнаружен только апатит. Среднее содержание апатита соответственно 0.1 и 0.05%. Доли массы Р, сконцентрированные в апатите, соответственно, 20 и 25.4.

Таблица 6.6

**Доли масс Р (%), сконцентрированные в фосфатах параметаморфических пород**

| Минералы | Метапесчаники              | Парагнейсы и парасланцы | Карбонатные породы | Железистые породы | Параметаморфиты в целом |
|----------|----------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|
| Монацит  | 0.06 ( $3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.2 (0.0009)            | Не опр.            | Не опр.           | 0.17 (0.0008)           |
| Апатит   | 71.8 (0.23)                | 65.93 (0.2)             | 16.4 (0.12)        | 37.9 (0.1)        | 62.5 (0.2)              |
| Сумма    | 71.86 (0.23)               | 66.13 (0.2)             | 16.4 (0.12)        | 37.9 (0.1)        | 62.67 (0.2)             |

Таблица 6.7

**Доли масс Р (%), сконцентрированные в фосфатах ортометаморфических пород**

| Минералы | Гранито-гнейсы               | Метариолиты                  | Метаандезиты | Метабазиты                   | Ортометаморфические породы в целом |
|----------|------------------------------|------------------------------|--------------|------------------------------|------------------------------------|
| Монацит  | 0.38 (0.0027)                | < 0.01 ( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.      | < 0.01 ( $4 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.3 (0.0022)                       |
| Ксенотим | 0.01 ( $7.5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                      | Не опр.      | Не опр.                      | 0.01 ( $6.2 \cdot 10^{-5}$ )       |
| Апатит   | 38.9 (0.19)                  | 28.18 (0.076)                | 10.8 (0.045) | 6.47 (0.04)                  | 37.47 (0.16)                       |
| Сумма    | 37.19 (0.18)                 | 28.18 (0.076)                | 10.8 (0.045) | 6.47 (0.04)                  | 37.77 (0.16)                       |

но-гнейсового слоя главный концентратор Р также апатит. Магматические породы этого слоя характеризуются пониженной ролью фосфатов (табл. 6.5). Максимальная концентрация Р в фосфатах установлена в параметаморфических породах, особенно в метапесчаниках (табл. 6.6). Ортометаморфические породы в целом характеризуются средней ролью фосфатов (табл. 6.7), но роль эта увеличивается от пород основных к кислым.

### 6.2.3. Обсуждение полученных данных

Данные о вариациях содержаний Р в горных породах относительно многочисленны, поэтому полученные сведения о средних содержаниях и распределении масс Р в ассоциации горных пород, слагающих верхнюю часть континентальной коры, пока можно считать относительно корректными. Поскольку количество публикаций быстро увеличивается, желательны уточнение и детализация полученных данных, в частности оценка закономерностей вариаций содержания Р в наиболее важных горных породах.

По расчету, роль апатита в верхней части континентальной коры практически соответствует той, которая была определена раньше для верхней части всей земной коры (Григорьев, 1999). Это косвенное свидетельство достаточной корректности новых данных. Роль монацита по новым данным меньше, чем по отмеченным выше прежним. Новые данные основаны на более обширном материале, поэтому они более корректны. Но в обоих случаях исходные данные имели недостатки. Модель А.Б. Ронова с коллегами (1990) наиболее корректная и детальная, но даже после некоторой дополнительной детализации она не вполне соответствует поставленной задаче. Некоторые горные породы соединены в группы, соотношение масс разных горных пород в которых неизвестно, изученность же части горных пород недостаточная. Пример – глины и глинистые сланцы. Проанализировано больше 119 проб, взятых вне полей фосфоритовых месторождений, но только одна представлена аргиллитом, остальные – глинами и суглинками. Модель не позволяет определить соотношение масс горных пород одинаковых в петрографическом отношении, но с разной геохимической специализацией. Определение роли фосфатов в масштабах всей верхней части континентальной коры базируется на результатах анализов тысяч проб, поэтому влияние индивидуальных особенностей конкретных разновидностей горных пород здесь несущественно. Роль же фосфатов в отдельных горных породах определена преимущественно на основании результатов анализов сотен и даже десятков проб и здесь влияние индивидуальных особенностей изученных разновидностей может быть существенным. В частности, роль фосфатов в парагнейсах и метапесчаниках, возможно, преувеличена. Преобладающие методы количественных анализов дают возможность учета частиц акцессорных минералов размером  $> 10\text{--}50$  мкм, поэтому исходные данные о содержании фосфатов в горных породах (особенно в осадочных) преимущественно преуменьшены.

Возможность сопоставления полученных данных с опубликованными результатами изучения минеральных балансов Р в конкретных пробах горных пород минимальная. Представляют интерес определения содержаний Р в породообразующих минералах на микроанализаторе. Изучены минералы из гранитов и аплита массива Педробернардо в Испании (Беа и др., 1991). Содержание Р в этих гранитах и аплите повышенное (0.12–0.28%). Установлена обратная зависимость содержания Р в полевых шпатах от наличия в них микровключений фосфатов. При отсутствии микровключений содержание Р в полевых шпатах 0.087–0.28%, при наличии микровключений – 0.044–0.061%. Содержания Р в слюдах из гранитов: в биотите – 0.17, муско-

вите – 0.014%. Автор пересчитал отмеченные данные в предположении о том, что минеральный состав гранитов обычный. Получилось, что в полевых шпатах и слюдах находится 47–72% масс Р. Но использование подобных данных для косвенного определения роли фосфатов некорректно. Суммарные погрешности могут быть соизмеримы с определяемыми величинами (Григорьев, 1999). Надежны только результаты определений полных минеральных балансов Р. В известной автору литературе (за исключением его собственных работ) таких данных нет. Автором были рассчитаны 3 минеральных баланса Р в метасоматитах Ново-Песчанского скарново-магнетитового месторождения (Григорьев, 1999). Установлено, что в андрадитовом скарне с малым содержанием Р (0.005%) в апатите сконцентрировано 18% массы этого элемента. Главный носитель Р здесь андрадит (77% массы Р). В эпидозите и андрадитовом скарне с несколько повышенным содержанием Р (0.08 и 0.15%) в апатите оказалось сконцентрировано 52 и 45% масс этого элемента. Эти результаты косвенно подтверждают представление о том, что полученные оценки средней роли фосфатов в распространенных горных породах преимущественно минимально возможные.

Полученные данные – очередное приближение к истине. Они нуждаются в уточнении и детализации, но для этого нужна более точная модель верхней части континентальной коры и дополнительные данные о содержании фосфатов в горных породах.

#### **6.2.4. Выводы**

Среднее содержание Р в верхней части континентальной коры 0.069%. Максимальным средним содержанием Р характеризуются метаморфические породы существенно карбонатного состава, а также магматические породы среднего и основного состава, но средние величины коэффициентов концентрации минимальные, поэтому распределение массы Р в ассоциации горных пород почти пропорционально их массам. Главные носители Р метаморфические породы, в которых сосредоточено 60.51% массы Р.

В верхней части континентальной коры в фосфатах сконцентрировано 35.67% массы Р, в том числе: 33.54 в апатите, 1.89 в карбонат-апатите, 0.23 в монаците, 0.01 в ксенотиме. Вопрос о формах нахождения остальной части массы Р пока остается открытым. Цифры, характеризующие роль фосфатов как носителей Р, преимущественно минимально возможные.

### **6.3. МЫШЬЯК, СУРЬМА, ВИСМУТ**

#### **6.3.1. Среднее содержание и распределение масс As, Sb, Bi в верхней части континентальной коры**

В геохимическом и минералого-геохимическом отношениях As, Sb, Bi изучены крайне слабо. Литературные данные об их средних содержаниях в горных породах основаны на результатах немногочисленных анализов (Иванов, 1996, кн. 3). Автором при первых расчетах (Григорьев, 2003а) средние содержания As и Sb в магматических породах гранитно-гнейсового слоя были

условно приняты по Л.В. Овчинникову (1990). Содержания  $Bi$  в гранитах, граптодиоритах, базитах и ультрабазитах средние арифметические по данным (Овчинников, 1990; Федорчук, Минцер, 1990). В остальных горных породах вероятные средние содержания  $As$ ,  $Sb$ ,  $Bi$  определены приблизительно по результатам единичных или немногочисленных анализов. Автор ориентировался на общий уровень содержаний каждого из элементов во всей ассоциации горных пород. Повышенные содержания были учтены с коэффициентами, соответствующими вероятной встречаемости таких содержаний. В отношении  $As$  за основу приняты данные (Onishi, Sandell, 1995). Дополнительные данные (Волкова и др., 1994; Гавшин, Бахтуров, 1989; Глухан, Серых, 1999; Иванов, 1996, кн. 3; Карапетян, Меликсетян, 1981; Gromet et al., 1984). В отношении  $Sb$  за основу приняты данные (Онисси, Санделл, 1959). Дополнительные данные (Волкова и др., 1994; Иванов, 1996). Не учтены данные о содержаниях  $Sb$  в песках и песчаниках –  $0.00026\%$  (Иванов, 1996), метапесчаниках –  $0.00059$  (Волкова и др., 1994), кислых вулканитах –  $0.0042$  (Карапетян, Меликсетян, 1981). Вместо них были приведены предполагаемые средние величины (Григорьев, 2003а). В отношении  $Bi$  за основу приняты данные (Федорчук, Минцер, 1990), учтены также данные (Волкова и др., 1994; Геохимия магматизма..., 1982; Иванов, 1996; Пачаджанов и др., 1975). Здесь (см. табл. 6.1) приведены цифры, исправленные впоследствии (Григорьев, 2007) с учетом дополнительных литературных данных (Кузнецов и др., 2006; Мизенс и др., 2006; Di Leo et al., 2002; Huber et al., 2001).

Исправленные величины среднего содержания  $As$ ,  $Sb$ ,  $Bi$  в верхней части континентальной коры:  $As - 5.6 \cdot 10^{-4}$ ,  $Sb - 8.1 \cdot 10^{-5}$ ,  $Bi - 2.9 \cdot 10^{-5} \%$  несколько больше величин, публиковавшихся в последние 50 лет другими исследователями:  $As - (1.5-4.8)10^{-4} \%$ ,  $Sb - (2-4.5)10^{-5}$ ,  $Bi - (0.35-2.3)10^{-5}$  (Rudnick, Gao, 2004). Максимальное среднее содержание этих элементов установлено в глинистых породах и продуктах их метаморфизма, затем следуют магматические породы среднего и основного состава, но средние величины коэффициентов концентрации во всех случаях минимальные –  $1.6-2$ , т. е. среднее содержание  $As$ ,  $Sb$ ,  $Bi$  мало зависит от состава горных пород. Главные носители  $As$ ,  $Sb$ ,  $Bi$  осадочные породы и продукты их метаморфизма. Сосредоточенные в них доли массы, %:  $As - 84.44$ ,  $Sb - 73.77$ ,  $Bi - 82.59$ . Согласно имеющимся данным,  $As$ ,  $Sb$  «слабоизбыточные элементы». Наблюдается обратная зависимость «избыточности»  $As$ ,  $Sb$  в континентальных осадочных породах от масс их атомов. Отношение установленных в континентальных осадочных породах средних содержаний (см. табл. 6.1) к тем, которые могли быть заимствованы при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава:  $As - 1.8$ ,  $Sb - 1.5\%$  (расчет изоалюминиевым методом). Распределение  $Bi$  соответствует требованию геохимического баланса.

### **6.3.2. Средние доли масс $As$ , $Sb$ , $Bi$ , сконцентрированные в собственных минералах**

По имеющимся данным, главными минералами-концентраторами  $As$ ,  $Sb$ ,  $Bi$ , кроме их собственных минералов, являются в основном различные сульфиды и особенно пирит. Данные о содержаниях  $As$ ,  $Sb$ ,  $Bi$  в рудных и

породообразующих минералах немногочисленны и преимущественно некорректны. Большинство их не сопровождается сведениями о содержании As, Sb, Bi в тех горных породах или рудах, из которых были выделены изученные минералы. Согласно таким данным, содержания As, Sb, Bi в породообразующих минералах варьируют преимущественно вблизи кларковых (Иванов, 1996). Заключение о роли конкретных минералов в качестве носителей As, Sb, Bi (Иванов, 1996; Карпущина, Баранов, 1981; Кудрявцева, Ильина, 1982), как правило, не сопровождается достаточными доказательствами. Но в литературе имеются результаты количественных и полуколичественных минералогических анализов тысяч проб горных пород. Они – основа данного исследования.

Средние содержания мышьяковых, сурьмяных и висмутовых минералов в горных породах рассчитаны по опубликованным результатам более чем 2160 количественных и полуколичественных минералогических анализов, выполненных методами, позволявшими учесть эти минералы. Наиболее изучены (в скобках число проб) пески и песчаники (> 990), граниты (379), сиениты (210), гранодиориты включая прочие гранитоиды повышенной основности (126). Мышьяковые, сурьмяные и висмутовые минералы были установлены только в некоторых пробах. При расчете предполагалось, что если отмеченные минералы в пробе не установлены, то их там не было. Главные источники использованных данных отмечены в разделе 6.2.2. Здесь отмечены только те, в которых имеются данные о мышьяковых, сурьмяных, висмутовых минералах: пески западного Прикамья (Воронов, 1999); палеозойские песчаники Центрального Таджикистана (Бабкин, 1986); кавказские липариты и липарит-дацитовые и андезитовые порфиры, базальтовые, долеритовые, диабазовые порфириты (Ляхович, 1963; Ляхович, Чирвинская, 1961; Мнацаканян, 1965); трахилипариты, трахибазальты и трахидиабазы северо-восточной части СССР (Ипатьева, Соловьев, 1982); граниты, гранодиориты (включая другие гранитоиды повышенной основности) СССР (Бартикян, 1968; Гавшин, Бахтуров, 1982; Ипатьева, 1976; Ляхович, 1967; Недашковский, 1982; Туровский, Кокарев, 1968); габброиды Дальнего Востока СССР и Украинского щита (Недашковский, 1982; Чернышов, 1971; Чернышов, Плаксенко, 1982); сиениты (включая прочие щелочные гранитоиды) Кольского полуострова (Батиева, Бельков, 1984; Бельков, 1979; Тихоненкова, 1982) и Северного Тянь-Шаня (Туровский, Кокарев, 1968); дуниты, перидотиты, серпентиниты Украинского щита (Чернышов, 1971; Чернышов, Плаксенко, 1982); метапесчаники Тувы (Ляхович, 1966); докембрийские кварциты (метапесчаники) Киргизского хребта (Кокарев и др., 1986); парagneйсы и парасланцы СССР (Ляхович, 1966; Носырев и др., 1990); гранитоgneйсы СССР (Ляхович, 1966, 1967; Недашковский, 1982; Носырев и др., 1990); метаандезиты безрудные, содержащие кварц амфиболиты района Китетибердинского вольфрамового месторождения на Северном Кавказе (Кременецкий, Овчинников, 1986); докембрийские metabазиты: амфиболиты и габбро-амфиболиты Центрального Памира (Акрамов, Дусматова, 1986); аподиабазовые амфиболиты и зеленые сланцы Приполярного Урала (Крылова и др., 1986).

Таблица 6.8

**Роль мышьяковых минералов как носителей As в верхней части континентальной коры**

| Минералы    | Содержание As в минералах, % | Осадочный слой          |                  | Гранитно-гнейсовый слой |                  | Верхняя часть континентальной коры |                  |
|-------------|------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
|             |                              | Содержание минералов, % | Доли массы As, % | Содержание минералов, % | Доли массы As, % | Содержание минералов, %            | Доли массы As, % |
| Пираргирит  | 0.73                         | $4.5 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01           | $8.3 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01           | $7.4 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01           |
| Тетраэдрит  | 3.38                         | $3.3 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01           | $6.5 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01           | $5.7 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01           |
| Фрейбергит  | 3.44                         | $2.3 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01           | $4.4 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01           | $3.9 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01           |
| Кобальтин   | 44.3                         | Не опр.                 | Не опр.          | $1.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.09             | $8.4 \cdot 10^{-7}$                | 0.07             |
| Герсдорфит  | 44.9                         | Не опр.                 | Не опр.          | $4 \cdot 10^{-6}$       | 0.35             | $3 \cdot 10^{-6}$                  | 0.24             |
| Арсенопирит | 44.9                         | $1.9 \cdot 10^{-6}$     | 0.13             | $1.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.95             | $8.8 \cdot 10^{-6}$                | 0.71             |
| Никелин     | 54.9                         | Не опр.                 | Не опр.          | $6.7 \cdot 10^{-6}$     | 0.71             | $5.1 \cdot 10^{-6}$                | 0.5              |
| Аурипигмент | 60.9                         | $2.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.23             | $3.1 \cdot 10^{-7}$     | 0.04             | $8.5 \cdot 10^{-7}$                | 0.09             |
| Реальгар    | 69.7                         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.12             | $4.8 \cdot 10^{-10}$    | < 0.01           | $2.8 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01           |
| Леллингит   | 70.9                         | Не опр.                 | Не опр.          | $6.6 \cdot 10^{-10}$    | < 0.01           | $5 \cdot 10^{-10}$                 | < 0.01           |
| Всего       |                              | $5.7 \cdot 10^{-6}$     | 0.48             | $2.3 \cdot 10^{-5}$     | 3.14             | $1.5 \cdot 10^{-5}$                | 1.61             |

Таблица 6.9

**Доли масс As (%), сконцентрированные в мышьяковых минералах горных пород осадочного слоя**

| Минералы    | Осадочные породы           |                              | Вулканогенные породы          |                              |                            |                              |
|-------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
|             | Пески и песчаники          | В целом                      | Кислые                        | Средние                      | Основные                   | В целом                      |
| Арсенопирит | 0.02 ( $3 \cdot 10^{-7}$ ) | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 10.4 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )    | 0.18 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                    | 2.25 ( $1.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Аурипигмент | Не опр.                    | Не опр.                      | 7.08 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )    | 6.09 ( $2.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 1.52 ( $5 \cdot 10^{-6}$ ) | 4.31 ( $1.7 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Реальгар    | Не опр.                    | Не опр.                      | 2.43 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )  | 2.79 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | 1.74 ( $5 \cdot 10^{-6}$ ) | 2.24 ( $7.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Всего       | 0.02 ( $3 \cdot 10^{-7}$ ) | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 19.91 ( $1.7 \cdot 10^{-4}$ ) | 6.32 ( $3.6 \cdot 10^{-5}$ ) | 3.04 ( $1 \cdot 10^{-5}$ ) | 8.51 ( $3.7 \cdot 10^{-5}$ ) |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Средние содержания As, Sb, Bi в их собственных минералах определены приблизительно по данным справочников. Лишь в самородном висмуте среднее содержание Bi теоретическое. Расчеты показали следующее.

**Мышьяк.** Согласно полученным данным, роль мышьяковых минералов как носителей As наиболее значительна в гранитно-гнейсовом слое (табл. 6.8). В осадочном слое роль их минимальная. Обеспечена она в основном вулканогенными породами (табл. 6.9). Мышьяковые минералы в большинстве осадочных пород не обнаружены, в песчаниках установлен арсенопирит, но роль его как носителя As в совокупности осадочных пород мала (см. табл. 6.9). Роль мышьяковых минералов максимальна в гранитах и гранодиоритах (табл. 6.10). Среди изученных метаморфических пород мышьяковые минералы чаще отмечаются в парасланцах (включая парagneйсы) и гранитогнейсах (табл. 6.11).

**Сурьма.** Роль сурьмяных минералов как носителей Sb в верхней части континентальной коры в целом мала (табл. 6.12), особенно в осадочном

Таблица 6.10

**Доли масс As (%), сконцентрированные в мышьяковых минералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы    | Граниты                          | Гранодиориты                     | Базиты                          | Сиениты                       | Ультрабазиты                  | Магматические породы в целом      |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Кобальтин   | 2.77<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )    | Не опр.                          | 0.09<br>( $4 \cdot 10^{-7}$ )   | Не опр.                       | Не опр.                       | 1.64<br>( $6.3 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Арсенопирит | 15.7<br>( $5.6 \cdot 10^{-5}$ )  | 9.98<br>( $4 \cdot 10^{-5}$ )    | 0.45<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | 1.28<br>( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.21<br>( $6 \cdot 10^{-7}$ ) | 11.9<br>( $4.4 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Аурипигмент | 0.01<br>( $2.3 \cdot 10^{-8}$ )  | 2.3<br>( $6.8 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                         | Не опр.                       | Не опр.                       | 0.64<br>( $1.8 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Леллингит   | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                         | 0.51 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )    | Не опр.                       | < 0.01<br>( $3.8 \cdot 10^{-9}$ ) |
| Всего       | 18.48<br>( $6.6 \cdot 10^{-5}$ ) | 12.28<br>( $4.7 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.54<br>( $2.4 \cdot 10^{-6}$ ) | 1.79<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.21<br>( $6 \cdot 10^{-7}$ ) | 14.18<br>( $5.3 \cdot 10^{-5}$ )  |

Таблица 6.11

**Доли масс As (%), сконцентрированные в мышьяковых минералах  
метаморфических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы    | Параметаморфические породы   |                                  |                                 | Ортометаморфические породы    |                               |                               |                                 |
|-------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|             | Метапесчанники               | Парасланцы                       | В целом                         | Гранито-гнейсы                | Метаандезиты                  | Метабазиты                    | В целом                         |
| Герсдорфит  | Не опр.                      | 0.47<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )    | 0.44<br>( $9 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                       | Не опр.                       | Не опр.                       | Не опр.                         |
| Арсенопирит | 0.3                          | Не опр.<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.02<br>( $4 \cdot 10^{-7}$ )   | 1.28<br>( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | 3.21<br>( $5 \cdot 10^{-5}$ ) | 2.72<br>( $2 \cdot 10^{-5}$ ) | 1.87<br>( $7.5 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Никелин     | Не опр.                      | 0.92<br>( $1.6 \cdot 10^{-5}$ )  | 0.08<br>( $1.4 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.39<br>( $1 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                       | Не опр.                       | 0.25<br>( $8.2 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Всего       | 0.3<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ ) | 1.39<br>( $2.6 \cdot 10^{-5}$ )  | 0.54<br>( $1.1 \cdot 10^{-5}$ ) | 1.67<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ ) | 3.21<br>( $5 \cdot 10^{-5}$ ) | 2.72<br>( $2 \cdot 10^{-5}$ ) | 2.12<br>( $8.3 \cdot 10^{-6}$ ) |

Таблица 6.12

**Роль сурьмяных минералов как носителей Sb в верхней части континентальной коры**

| Минералы   | Содержание Sb в минералах, % | Осадочный слой          |                  | Гранитно-гнейсовый слой |                  | Верхняя часть континентальной коры |                  |
|------------|------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
|            |                              | Содержание минералов, % | Доли массы Sb, % | Содержание минералов, % | Доли массы Sb, % | Содержание минералов, %            | Доли массы Sb, % |
| Стефанит   | 15.07                        | $2 \cdot 10^{-8}$       | 0.003            | $4 \cdot 10^{-8}$       | 0.008            | $3.5 \cdot 10^{-8}$                | 0.007            |
| Фрейбергит | 21.18                        | $2.3 \cdot 10^{-8}$     | 0.005            | $4.4 \cdot 10^{-8}$     | 0.012            | $3.9 \cdot 10^{-8}$                | 0.01             |
| Пираргирит | 21.65                        | $4.5 \cdot 10^{-8}$     | 0.011            | $8.3 \cdot 10^{-8}$     | 0.023            | $7.4 \cdot 10^{-8}$                | 0.02             |
| Тетраэдрит | 24.52                        | $3.3 \cdot 10^{-8}$     | 0.009            | $6.5 \cdot 10^{-8}$     | 0.02             | $5.7 \cdot 10^{-8}$                | 0.017            |
| Буланжерит | 25.1                         | Не опр.                 | Не опр.          | $5.2 \cdot 10^{-10}$    | < 0.001          | $4 \cdot 10^{-10}$                 | < 0.001          |
| Джемсонит  | 33.83                        | Не опр.                 | Не опр.          | $3.7 \cdot 10^{-9}$     | 0.002            | $6.5 \cdot 10^{-8}$                | 0.001            |
| Антимонит  | 71.66                        | $2.2 \cdot 10^{-9}$     | 0.002            | $5.2 \cdot 10^{-9}$     | 0.005            | $4.4 \cdot 10^{-9}$                | 0.004            |
| Всего      | —                            | $1.2 \cdot 10^{-7}$     | 0.03             | $2.4 \cdot 10^{-7}$     | 0.071            | $2.1 \cdot 10^{-7}$                | 0.061            |



Таблица 6.13

**Доли масс Sb, сконцентрированные в сурьмяных минералах осадочных пород**

| Минералы   | Пески и песчаники   |       | Глины и глинистые сланцы |         | Осадочные породы в целом |       |
|------------|---------------------|-------|--------------------------|---------|--------------------------|-------|
|            | 1*                  | 2     | 1                        | 2       | 1                        | 2     |
| Стефанит   | $7 \cdot 10^{-9}$   | 0.002 | $3.4 \cdot 10^{-8}$      | 0.004   | $2 \cdot 10^{-8}$        | 0.003 |
| Фрейбергит | $8 \cdot 10^{-9}$   | 0.003 | $4 \cdot 10^{-8}$        | 0.007   | $2.3 \cdot 10^{-8}$      | 0.005 |
| Пираргирит | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.005 | $8 \cdot 10^{-8}$        | 0.017   | $4.6 \cdot 10^{-8}$      | 0.012 |
| Тетраэдрит | $1.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.005 | $6 \cdot 10^{-8}$        | 0.011   | $3.4 \cdot 10^{-8}$      | 0.009 |
| Антимонит  | $1 \cdot 10^{-8}$   | 0.011 | Не опр.                  | Не опр. | $2.6 \cdot 10^{-9}$      | 0.002 |
| Всего      | $5.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.026 | $2.1 \cdot 10^{-7}$      | 0.035   | $1.5 \cdot 10^{-7}$      | 0.03  |

\* Здесь и в последующих таблицах: 1 – среднее содержание минералов, %; 2 – доли масс Sb (% от его общей массы в данной горной породе).

Таблица 6.14

**Доли масс Sb, сконцентрированные в сурьмяных минералах вулканитов осадочного слоя**

| Минералы   | Кислые              |       | Средние             |       | Основные            |       | В целом             |       |
|------------|---------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|
|            | 1                   | 2     | 1                   | 2     | 1                   | 2     | 1                   | 2     |
| Стефанит   | $2.6 \cdot 10^{-8}$ | 0.008 | $3 \cdot 10^{-8}$   | 0.006 | $1 \cdot 10^{-8}$   | 0.001 | $1.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.003 |
| Фрейбергит | $2.9 \cdot 10^{-8}$ | 0.012 | $3.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.011 | $1 \cdot 10^{-8}$   | 0.002 | $2 \cdot 10^{-8}$   | 0.005 |
| Пираргирит | $5.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.025 | $7 \cdot 10^{-8}$   | 0.021 | $2.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.004 | $4.1 \cdot 10^{-8}$ | 0.01  |
| Тетраэдрит | $4.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.021 | $5.1 \cdot 10^{-8}$ | 0.018 | $1.6 \cdot 10^{-8}$ | 0.004 | $3 \cdot 10^{-8}$   | 0.008 |
| Всего      | $1.5 \cdot 10^{-7}$ | 0.066 | $1.9 \cdot 10^{-7}$ | 0.056 | $5.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.011 | $1.1 \cdot 10^{-7}$ | 0.026 |

Таблица 6.15

**Доли масс Sb, сконцентрированные в сурьмяных минералах магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы   | Граниты             |       | Гранодиориты        |         | Базиты              |         | В целом             |       |
|------------|---------------------|-------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|-------|
|            | 1                   | 2     | 1                   | 2       | 1                   | 2       | 1                   | 2     |
| Стефанит   | $1.6 \cdot 10^{-8}$ | 0.008 | $2.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.008   | $1.4 \cdot 10^{-8}$ | 0.002   | $1.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.006 |
| Фрейбергит | $1.9 \cdot 10^{-8}$ | 0.013 | $2.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.012   | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.003   | $2.1 \cdot 10^{-8}$ | 0.01  |
| Пираргирит | $3.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.027 | $5.6 \cdot 10^{-8}$ | 0.024   | $3.1 \cdot 10^{-8}$ | 0.006   | $4.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.02  |
| Тетраэдрит | $2.6 \cdot 10^{-8}$ | 0.021 | $4 \cdot 10^{-8}$   | 0.02    | $2 \cdot 10^{-8}$   | 0.004   | $2.9 \cdot 10^{-8}$ | 0.016 |
| Буланжерит | $5 \cdot 10^{-9}$   | 0.004 | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | $3 \cdot 10^{-9}$   | 0.002 |
| Антимонит  | $5 \cdot 10^{-8}$   | 0.12  | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | $3 \cdot 10^{-8}$   | 0.049 |
| Всего      | $1.1 \cdot 10^{-7}$ | 0.193 | $1.5 \cdot 10^{-7}$ | 0.064   | $8 \cdot 10^{-8}$   | 0.015   | $1.3 \cdot 10^{-7}$ | 0.103 |

слое. Последнее обусловлено очень малым средним содержанием сурьмяных минералов в осадочных породах (табл. 6.13). В вулканогенных породах оно тоже невысокое (6.14). Несколько большей ролью сурьмяных минералов характеризуются гранитоиды (табл. 6.15). В метаморфических породах (табл. 6.16) роль сурьмяных минералов близка к средней для верхней части континентальной коры.

Таблица 6.16

**Доли масс Sb, сконцентрированные в сурьмяных минералах  
метаморфических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы   | Метапесчаники       |         | Парасланцы          |         | Гранито-гнейсы      |         | В целом             |       |
|------------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|-------|
|            | 1                   | 2       | 1                   | 2       | 1                   | 2       | 1                   | 2     |
| Стефанит   | $3.3 \cdot 10^{-8}$ | 0.007   | $8 \cdot 10^{-8}$   | 0.009   | $7.5 \cdot 10^{-9}$ | 0.003   | $4.4 \cdot 10^{-8}$ | 0.008 |
| Фрейбергит | $3.7 \cdot 10^{-8}$ | 0.011   | $9 \cdot 10^{-8}$   | 0.015   | $8.5 \cdot 10^{-9}$ | 0.005   | $4.9 \cdot 10^{-8}$ | 0.012 |
| Пираргирит | $7.4 \cdot 10^{-8}$ | 0.022   | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | 0.027   | $1.7 \cdot 10^{-8}$ | 0.011   | $9.1 \cdot 10^{-8}$ | 0.025 |
| Тетраэдрит | $5.3 \cdot 10^{-8}$ | 0.019   | $1.3 \cdot 10^{-7}$ | 0.025   | $1.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.009   | $7.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.022 |
| Джемсонит* | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | $5 \cdot 10^{-9}$   | 0.002 |
| Всего      | $2 \cdot 10^{-7}$   | 0.059   | $4.6 \cdot 10^{-7}$ | 0.076   | $5.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.028   | $2.6 \cdot 10^{-7}$ | 0.069 |

\* Джемсонит установлен в метабазах –  $1 \cdot 10^{-7} \%$ .

Таблица 6.17

**Роль висмутовых минералов как носителей Bi в верхней части континентальной коры**

| Минералы          | Содержание Bi в минералах, % | Гранитно-гнейсовый слой |                  | Верхняя часть континентальной коры |                  |
|-------------------|------------------------------|-------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
|                   |                              | Содержание минералов, % | Доли массы Bi, % | Содержание минералов, %            | Доли массы Bi, % |
| Тетрадимит        | 59.5                         | $2.1 \cdot 10^{-8}$     | 0.04             | $1.6 \cdot 10^{-8}$                | 0.03             |
| Висмутин          | 78.9                         | $1.2 \cdot 10^{-7}$     | 0.31             | $9.2 \cdot 10^{-8}$                | 0.25             |
| Бисмутит          | 81.5                         | $1.3 \cdot 10^{-7}$     | 0.34             | $1.1 \cdot 10^{-7}$                | 0.31             |
| Висмут самородный | 100                          | $5.7 \cdot 10^{-8}$     | 0.18             | $4.4 \cdot 10^{-8}$                | 0.15             |
| Всего             |                              | $3.1 \cdot 10^{-7}$     | 0.87             | $2.9 \cdot 10^{-7}$                | 0.74             |

Примечание: В осадочном слое определено только среднее содержание бисмутита –  $1.3 \cdot 10^{-8} \%$ .

Таблица 6.18

**Доли масс Bi (%), сконцентрированные в висмутовых минералах  
горных пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы          | Граниты                      | Сиениты                    | Парасланцы                 | Гранито-гнейсы             |
|-------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Тетрадимит        | 0.6 ( $2 \cdot 10^{-7}$ )    | Не опр.                    | Не опр.                    | Не опр.                    |
| Висмутин          | 3.94 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )   | 2.19 ( $5 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.07 ( $5 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.                    |
| Бисмутит          | 4.07 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                    | Не опр.                    | 0.82 ( $1 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Висмут самородный | 0.36 ( $7.3 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.                    | 0.09 ( $5 \cdot 10^{-8}$ ) | 1 ( $1 \cdot 10^{-7}$ )    |
| Всего             | 8.97 ( $2.3 \cdot 10^{-6}$ ) | 2.19 ( $5 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.16 ( $1 \cdot 10^{-7}$ ) | 1.82 ( $2 \cdot 10^{-7}$ ) |

**Висмут.** Роль висмутовых минералов как носителей Bi в верхней части континентальной коры тоже невелика, причем она существенна только в гранитно-гнейсовом слое (табл. 6.17), особенно в гранитах (табл. 6.18). Данных о вариациях содержания висмутовых минералов в осадочных породах почти нет. Бисмутит установлен в одной пробе песка (Воронцов, 1999). Его содержание здесь  $6.2 \cdot 10^{-5} \%$ . Среднее содержание в песках и песчаниках  $6.2 \cdot 10^{-8} \%$ . В песках и песчаниках в бисмутите сконцентрировано в среднем 0.25% массы Bi.

### 6.3.3. Обсуждение полученных данных

Сведений о вариациях содержаний As, Sb, Bi в горных породах мало. Поэтому полученные данные о среднем содержании As, Sb, Bi в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах нуждаются в уточнении. Наиболее вероятно некоторое преувеличение содержаний As и Sb в осадочных породах, поэтому данные о распределении масс As, Sb, Bi в ассоциации горных пород – только первое приближение к истине. Методы количественных определений содержания акцессорных минералов в горных породах несовершенны. Они дают возможность учета лишь частиц крупнее 10–50 мкм, а иногда даже крупнее 100 мкм. Кроме того, возможность учета мышьяковых и, особенно, сурьмяных и висмутовых минералов, вероятно, не всегда была реализована прежде всего из-за низких содержаний их в горных породах. Таким образом, приведенные выше величины минимально возможные. Возможности сопоставления новых данных с результатами изучения распределения As, Sb, Bi в ассоциациях минералов, представляющих конкретные пробы горных пород, ограничены. При определении роли собственных минералов как носителей малых и редких элементов в конкретных пробах горных пород погрешности могут быть соизмеримы с определяемыми величинами (Григорьев, 1999), поэтому надежными можно считать только данные, подтвержденные расчетом минеральных балансов интересующего элемента. Таких данных по As и Bi мало, по Sb – нет.

**Мышьяк.** Относительно подробно изучены два образца частично окисленных полиметаллических руд Шерловогорского месторождения (Кудрявцева, Ильина, 1982). Содержания As в них очень большие – 0.35 и 0.55%, но определены они не прямым анализом, а вычислениями по результатам анализов минералов. Согласно таким данным, в образцах 85 и 93% масс As сконцентрировано в арсенатах. Более корректно изучены метасоматиты Fe- и Cu-скарновых месторождений Турьинской группы на Урале (Григорьев, 1999). Содержание As в них меньше, но тоже большое: 0.0034, 0.035 и 0.065%. В двух первых установлен кобальтин. Сконцентрированные в нем доли масс As соответственно 13 и 1%. Наиболее важные носители As андрадит, кальцит, пирит. В совокупности всех приведенных данных прослеживается характерная для малых и редких элементов тенденция прямой зависимости роли собственных минералов от валового содержания элемента в породе (Григорьев, 1999).

**Висмут.** Определено содержание Bi в отмеченных выше образцах полиметаллических руд Шерловогорского месторождения (Кудрявцева, Ильина, 1982). Судя по расчету – содержания Bi в них очень большие – 0.0052 и 0.021%. Висмутовые минералы не установлены. Главные минералы-концентраторы Bi пирит и лимонит. В них сконцентрировано больше половины масс Bi. Несколько более корректно изучены 5 проб гранодиоритов Кураминских гор в Средней Азии (Дудин-Барковская, Юсупов, 1976). Содержание Bi в них  $2 \cdot 10^{-6}$ – $1.2 \cdot 10^{-5}$  %, т. е. несколько меньше кларкового. В двух пробах, содержащих  $1 \cdot 10^{-5}$  % Bi, установлены висмутин и самородный висмут, но при расчете минеральных балансов Bi они не учтены. Сум-

мы учтенных долей масс Bi в этих пробах 80 и 81, в остальных – 87–92%. Главные носители Bi в кураминских гранодиоритах полевые шпаты, но есть основания предполагать, что в отмеченных двух пробах роль висмутовых минералов заметная.

Приведенные литературные данные недостаточны для определения тех минимальных содержаний As, Sb, Bi в природных веществах, при которых появляются их собственные минералы.

#### 6.3.4. Выводы

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: As –  $5.6 \cdot 10^{-4}$ , Sb –  $8.1 \cdot 10^{-5}$ , Bi –  $2.9 \cdot 10^{-5}$ . Главные носители As, Sb, Bi осадочные породы и продукты их метаморфизма. Сосредоточенные в них доли массы, %: As – 84.44, Sb – 73.77, Bi – 82.59.

В мышьяковых минералах сконцентрировано 1.61% масс As, в том числе в арсенопирите – 0.71, никелине – 0.5, герсдорфите – 0.24, аурипигменте – 0.09, кобальтине – 0.07%. В сурьмяных минералах сконцентрировано 0.061% массы Sb, в том числе в пираргирите – 0.02, тетраэдрите – 0.017, фрейбергите – 0.01, в стефаните – 0.007, в антимоните – 0.004, в джемсоните – 0.001%. В висмутовых минералах сконцентрировано 0.74% массы Bi, в том числе в бисмутите – 0.31, висмутине – 0.25, висмуте самородном – 0.15, тетрадимите – 0.03%. Эти цифры минимально возможные. Полученные данные дают лишь самое первое представление о возможном уровне средних содержаний As, Sb, Bi в горных породах и о вероятной роли собственных минералов этих элементов в качестве носителей последних в верхней части континентальной коры.

Роль собственных минералов в качестве носителей As и Bi в верхней части континентальной коры относительно мала. Тем не менее даже в геохимическом отношении она существенна. Роль сурьмяных минералов очень мала. В этом отношении Sb ближе к рассеянным элементам, чем к редким. Среди континентальных пород наибольшей степенью концентрации масс As, Sb, Bi в собственных минералах характеризуются граниты, наименьшей – осадочные породы.

## **Глава 7**

### **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ КИСЛОРОДА**

---

#### **7.1. КИСЛОРОД**

##### **7.1.1. Среднее содержание и распределение масс О в верхней части континентальной коры**

Принятые средние содержания О в большинстве горных пород по А.Б. Ронову и др. (1990); в гранитах и гранодиоритах – по А.А. Беусу (1981); в гранито-гнейсах, метаандезитах, осадочном и гранитно-гнейсовом слоях, а также в верхней части континентальной коры по (Григорьев, 2003б). Во всех главных горных породах среднее содержание О близкое (табл. 7.1). Исключение – эвапориты, где оно минимальное. Максимальное среднее содержание О имеет место в кремнистых породах. Распределение О в верхней части континентальной коры почти пропорциональное массам главных горных пород. Это избыточный элемент. Среднее содержание О в осадочных породах континентальной коры (48.51%) больше того, которое может быть обеспечено за счет горных пород гранитно-гнейсового слоя современного состава (39.11% по расчету изоалюминиевым методом). В осадочных и параметаморфических породах находится 55.24% всей массы О.

##### **7.1.2. Средний минеральный баланс О в верхней части континентальной коры**

В масштабах всей верхней части континентальной коры распределение массы О в ассоциации минералов мономодальное и очень компактное (табл. 7.2). Практически вся его масса сосредоточена в силикатах, алюмосиликатах и кварце, характеризующихся содержанием О от 40 до 55%. Роль максиминералов фактически играют вода и свободный кислород, но это уже компоненты гидросферы и атмосферы. Главные минералы-носители полевые шпаты, слюды и кварц.

#### **7.2. СЕРА**

##### **7.2.1. Среднее содержание и распределение масс S в верхней части континентальной коры**

Среднее содержание S в осадочных породах, базитах, сиенитах, ультрабазитах, метабазитах, параметаморфических породах приведено по А.Б. Ронову с соавторами (1990) с небольшими поправками. Определение

Таблица 7.1

**Среднее содержание и распределение масс O, S, Se (%) в ассоциации  
горных пород верхней части континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород  | Среднее содержание |             |                                       | Доли масс    |              |               |
|-------------------------------------------|--------------|--------------------|-------------|---------------------------------------|--------------|--------------|---------------|
|                                           |              | O                  | S           | Se                                    | O            | S            | Se            |
| Пески и песчаники                         | 5.11         | 49.8               | 0.19        | $1 \cdot 10^{-5}$                     | 5.32         | 6.79         | 3.41          |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4         | 48.46              | 0.36        | $3.6 \cdot 10^{-5}$                   | 10.53        | 26.18        | 24.96         |
| Карбонатные породы                        | 3.85         | 49.12              | 0.25        | $2.7 \cdot 10^{-5}$                   | 3.95         | 6.73         | 6.93          |
| Кремнистые породы                         | 0.33         | 51.07              | 0.19        | Не опр.                               | 0.35         | 0.44         | Не опр.       |
| Эвапориты                                 | 0.26         | 13.15              | 5.34        | $4 \cdot 10^{-7}$                     | 0.07         | 9.71         | 0.01          |
| Кислые вулканы                            | 0.44         | 49.13              | 0.058       | $9.3 \cdot 10^{-6}$                   | 0.45         | 0.18         | 0.27          |
| Средние вулканы                           | 1.13         | 46.71              | 0.071       | $6.3 \cdot 10^{-6}$                   | 1.1          | 0.56         | 0.47          |
| Основные вулканы                          | 2.11         | 44.78              | 0.071       | $1.1 \cdot 10^{-5}$                   | 1.97         | 1.05         | 1.55          |
| Граниты                                   | 8.21         | 48.46              | 0.03        | $7 \cdot 10^{-6}$                     | 8.31         | 1.72         | 3.83          |
| Гранодиориты                              | 3.38         | 47.9               | 0.03        | $8 \cdot 10^{-6}$                     | 3.38         | 0.71         | 1.8           |
| Базиты                                    | 1.5          | 44.39              | 0.1         | $7 \cdot 10^{-6}$                     | 1.39         | 1.05         | 0.7           |
| Сиениты                                   | 0.05         | 45.73              | 0.03        | $5 \cdot 10^{-6}$                     | 0.05         | 0.01         | 0.02          |
| Ультрабазиты                              | 0.05         | 44.89              | 0.088       | $5 \cdot 10^{-6}$                     | 0.05         | 0.03         | 0.02          |
| Метапесчаники                             | 2.92         | 49.27              | 0.053       | $1 \cdot 10^{-5}$                     | 3.01         | 1.08         | 1.95          |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56        | 47.8               | 0.1         | $2 \cdot 10^{-5}$                     | 30.52        | 21.37        | 40.75         |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13         | 48.84              | 0.23        | Не опр.                               | 1.15         | 1.8          | Не опр.       |
| Железистые породы                         | 0.38         | 42.69              | 0.076       | Не опр.                               | 0.34         | 0.2          | Не опр.       |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21        | 47.97              | 0.106       | $7 \cdot 10^{-6*}$                    | 23.26        | 17.2         | 10.83*        |
| Метариолиты                               | 0.66         | 49.15              | 0.036       | $9.1 \cdot 10^{-6*}$                  | 0.68         | 0.17         | 0.4           |
| Метаандезиты                              | 1.03         | 47.41              | 0.03        | Не опр.                               | 1.02         | 0.22         | Не опр.       |
| Метабазиты                                | 3.29         | 45.11              | 0.1         | $1.1 \cdot 10^{-5*}$                  | 3.1          | 2.3          | 2.41          |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>   | <b>47.87</b>       | <b>0.14</b> | <b><math>1.5 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b>100</b>   | <b>99.5</b>  | <b>100.31</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95        | 48.51              | 0.36        | $2.7 \cdot 10^{-5}$                   | 20.22        | 49.85        | 35.31         |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68         | 45.89              | 0.069       | $9.4 \cdot 10^{-6}$                   | 3.52         | 1.79         | 2.29          |
| <b>Осадочный слой</b>                     | <b>23.63</b> | <b>48.1</b>        | <b>0.31</b> | <b><math>2.4 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b>23.74</b> | <b>51.64</b> | <b>37.6</b>   |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19        | 47.83              | 0.038       | $7.2 \cdot 10^{-6}$                   | 13.18        | 3.52         | 6.37          |
| Параметаморфиты                           | 34.99        | 47.9               | 0.1         | $1.8 \cdot 10^{-5}$                   | 35.02        | 24.45        | 42.7          |
| Ортометаморфиты                           | 28.19        | 47.64              | 0.1         | $7.3 \cdot 10^{-6*}$                  | 28.06        | 19.89        | 13.64*        |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой</b>            | <b>76.37</b> | <b>47.8</b>        | <b>0.09</b> | <b><math>1.2 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b>76.26</b> | <b>47.86</b> | <b>62.71</b>  |

\* Значения, принятые условно или вычисленные при недостаточном количестве исходных данных.

**Распределение масс О по минералам с разным его содержанием (%)  
в верхней части континентальной коры**

| Содержание О<br>в минералах | Минералы и сосредоточенные в них доли масс О<br>(в скобках)                                                                                                                                                              | Суммарные доли<br>масс О |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 25–30                       | Магнетит (0.38), гематит (0.05), Ti-магнетит (0.04)                                                                                                                                                                      | 0.47                     |
| 30–35                       | Ильменит (0.13)                                                                                                                                                                                                          | 0.13                     |
| 35–40                       | Апатит (0.11), гётит (0.06)                                                                                                                                                                                              | 0.17                     |
| 40–45                       | Биотит (6.52), роговая обманка (2.96), авгит (1.1), эпидот (1.05), альмандин (0.73), шамозит (0.62), прочие (2.87)                                                                                                       | 15.85                    |
| 45–50                       | Олигоклаз (14.44), калиевые полевые шпаты (9.55), андезин (6.55), альбит (4.09), кальцит (4.05), лабрадор (2.95), мусковит (2.02), рипидолит (1.89), клинохлор (0.69), парагонит (0.58), нонтронит (0.56), прочие (1.94) | 49.31                    |
| 50–55                       | Кварц (26.7), гидромусковит (2.64), опал (1.42), доломит (0.75), монтмориллонит (0.47), прочие (0.71)                                                                                                                    | 32.69                    |
| 55–60                       | Каолинит (0.3), бейделлит (0.19)                                                                                                                                                                                         | 0.49                     |
| Всего                       | Во всех минералах                                                                                                                                                                                                        | 99.11                    |

среднего содержания S в вулканитах осадочного слоя выполнено в основном по данным о составе четвертичных кислых, средних и основных лав Камчатки, Курильских островов и Японии (Апрелков и др., 1963; Бондаренко, Хотин, 1963; Набоко, 1963; Шатков, 1975); липаритов, обсидианов, перлитов Кавказа (Одикадзе, 1973); меловых кислых, средних и основных вулканитов Охотского побережья (Сперанская, 1963); девонских липаритов Алтая (Пугачева, 1981). В гранитах и гранодиоритах среднее содержание S принято по А.А. Беусу (1981), в гранито-гнейсах определено по данным о составе совокупности гранитоидов и гранито-гнейсов (Ронов и др., 1990) и гранитоидов (Беус и др., 1981). При расчете среднего содержания S в метариолитах использованы в основном данные А.Б. Ронова с соавторами (1990), О.А. Богатикова с коллегами – по докембрийским метавулканитам Балтийского щита (Магматические..., 1987), Р.Г. Язевой, В.В. Бочкарева (1995, 1998), по палеозойским метавулканитам Урала, И.П. Пугачевой и др. (1981) – по девонским метавулканитам Алтая. При расчете среднего содержания S в метаандезитах использованы в основном данные по Балтийскому щиту (Магматические..., 1987; Козлов, Иванов, 1995; Мирская, 1980), Уралу (Бушляков, Соболев, 1976; Язева, Бочкарев, 1995, 1998) и Алтаю (Пугачева и др., 1981).

Соответствующее этим данным среднее содержание S в верхней части континентальной коры 0.143%. Оно несколько больше, чем по данным других исследователей, публиковавшихся в последние 50 лет – 0.039–0.0953% (Rudnick, Gao, 2004). Наиболее высоким средним содержанием S характеризуются эвапориты; высоким – осадочные, параметаморфические и некоторые ортометаморфические породы. В осадочных породах сконцентрирована половина массы S. Еще 1/4 ее массы находится в параметаморфических породах. Сера «избыточный элемент». Ее среднее содержание в континен-

тальных осадочных породах в 5 раз больше того, которое могло быть обеспечено за счет выветривания гранитно-гнейсового слоя современного состава (расчет изоалюминиевым методом).

### **7.2.2. Доли масс S, сконцентрированные в ее собственных минералах**

Среднее содержание собственных минералов S в эвапоритах определено приблизительно на основании качественных и полуколичественных минералогических анализов (Юшкин, 1989; Лобанова, 1969; Кольцова, Яржемский, 1969). Метод – пересчет химического состава эвапоритов на минеральный состав. Среднее содержание собственных минералов S в остальных горных породах рассчитано по опубликованным в литературе результатам количественных и полуколичественных минералогических анализов более чем 2500 проб и образцов горных пород. При расчетах с помощью коэффициентов учтено разное качество опубликованных данных. Например, некоторые из них – это данные анализов отдельных проб, другие – средние результаты изучения десятков и даже сотен проб и образцов. Одни данные представляют главные, другие – второстепенные разновидности горных пород. Ниже перечислены главные источники исходных данных.

*Осадочные породы.* Четвертичные отложения восточной части Балтийского щита (Ильин, Сыромятина, 1972); четвертичные и мезозойские отложения Западной Сибири (Шумилова, 1971; Плуман, 1975); пески, песчано-глинистые и кремнисто-глинистые отложения Русской платформы (Карякин, 1951, 1954; Ронов и др., 1963); нижнерифейские песчаники и гравелиты Южного Урала (Сергеева, 1989); кайнозойские глины и мергели Предкарпатского соленосного бассейна (Даценко, 1969); девонские аллиты Полярного Урала (Ушатинский, Боровский, 1977, 1978); верхнеордовикские сланцы Огайо, Индианы, Кентукки (Scotford, 1965); известняки Русской платформы от меловых до докембрийских (Тимофеев, 1960); палеозойские терригенные породы Центрального Таджикистана (Бабкин, 1986).

*Вулканиды осадочного слоя.* Липариты Северного Кавказа (Ляхович, Чирвинская, 1961; Ляхович, 1963); палеогеновые и меловые эффузивные породы Армении (Држбашян, 1965; Мнацаканян, 1965); меловые липарито-дациты Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (Ичетовкин, 1978); пикритовые габбро-долериты и палагонитовые траппы Восточной Сибири (Альмухамедов, 1967; Наумов, Гурин, 1967).

*Гранитоиды.* Гранитоиды СССР (Ляхович, 1967); плагиограниты Армении (Бартиян, 1968); палеозойские гранитоиды Северного Тянь-Шаня (Туровский, Кокарев, 1968) и Урала (Бушляков, Соболев, 1976); диориты Приполярного Урала (Фишман и др., 1966) и Воронежского кристаллического массива (Чернышов, 1971).

*Базиты.* Уральские габбро, габбро-диабазы и прочие габброиды (Соболев, 1968; Фишман и др., 1968); метасоматически измененные габбро Бельтауского массива в Узбекистане (Кромская, 1973); лейкогаббро Казахстана (Спиридонов, 1971); докембрийские габброиды Воронежского кристаллического массива (Чернышов, 1971).



*Сиениты.* Палеозойские щелочные гранитоиды Северного Тянь-Шаня (Туровский, Кокарев, 1968); сиениты и сиенитоподобные породы Кольского полуострова (Батиева, Бельков, 1984, 1985); кембрийские сиениты Приполярного Урала (Фишман и др., 1968).

*Ультрабазиты.* Перидотиты Приполярного Урала (Фишман и др., 1968); докембрийские дуниты, перидотиты, серпентиниты Воронежского кристаллического массива (Чернышов, 1971).

*Метапесчаники.* Докембрийские метапесчаники, конгломераты, кварциты Приполярного Урала и Украинского щита (Фишман и др., 1966; Вигорова, Покровский, 1973; Носырев и др., 1986).

*Парагнейсы и парасланцы.* Докембрийские парасланцы Приполярного Урала (Вигорова, Покровский, 1973); метаосадочные сланцы предкарельского комплекса (Кейвская и Стрельнинская серии) Балтийского щита (Вулканизм..., 1987); докембрийские кристаллические сланцы Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Гранито-гнейсы.* Гнейсы гранулитовой фации Украинского щита (Носырев и др., 1986); гранито-гнейсы Урала и Тувы (Ляхович, 1967).

*Метариолиты.* Уральские метадациты именновской свиты (Гурбанов и др., 1999); рифейские метаморфизованные кварцевые порфиры Приполярного Урала (Фишман и др., 1968); доордовикские кварцевые амфиболиты Приполярного Урала (Фишман и др., 1966).

*Метаандезиты.* Протерозойские, содержащие кварц амфиболиты Северного Кавказа (Кременецкий, Овчинников, 1986); часть докембрийских амфиболитов Украинского щита Носырев и др., 1986).

*Метабазиты.* Метабазальты из Уральской сверхглубокой скважины СГ-4 (Гурбанов и др., 1999); докембрийские зеленые сланцы и послеордовикские метаморфизованные диабазы и порфиры Приполярного Урала (Крылова и др., 1986; Фишман и др., 1966, 1968); докембрийские габбро-амфиболиты Центрального Памира (Акрамов, Дусматов, 1986); докембрийские метагабброиды и ортоамфиболиты Воронежского кристаллического массива (Чернышов, 1971).

Полученные величины среднего содержания пирита и пирротина в большинстве горных пород оказались несколько меньше соответствующих среднему химическому составу этих пород. Для того чтобы принять полученные значения, требовалась неприемлемая корректировка средних содержаний минералов, характеризующихся разным соотношением Fe/O. Такая корректировка привела бы к слишком большим погрешностям в средних минеральных балансах главных химических элементов, поэтому была выполнена минимально возможная корректировка средних содержаний пирита и пирротина в сторону их увеличения.

Средние содержания S в скаполитах и нозеане рассчитаны по опубликованным результатам их химических анализов. Средние содержания S в остальных ее собственных минералах приняты равными теоретическим. Перед характеристикой полученных результатов отметим, что содержание S минимальное для ее максиминералов – 3.7% (Григорьев, 1999). Поэтому такие силикаты, как скаполиты и нозеан, могут быть ее максиминералами только в частных случаях. В масштабах верхней части континентальной коры главные максиминералы серы сульфиды и сульфаты.

Таблица 7.3

**Роль максиминералов как носителей S в верхней части континентальной коры**

| Минералы        | Содержание S в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|                 |                             | Содержание минералов, % | Доли массы S, % | Содержание минералов, % | Доли массы S, % | Содержание минералов, %            | Доли массы S, % |
| Галенит         | 13.4                        | $1.7 \cdot 10^{-5}$     | < 0.01          | $1.9 \cdot 10^{-5}$     | < 0.01          | $1.9 \cdot 10^{-5}$                | < 0.01          |
| Целестин        | 17.4                        | $7.3 \cdot 10^{-4}$     | 0.04            | $2.9 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $1.7 \cdot 10^{-4}$                | 0.02            |
| Ярозит          | 12.8                        | 0.0017                  | 0.07            | $1.9 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $4 \cdot 10^{-4}$                  | 0.04            |
| Барит           | 13.7                        | 0.0031                  | 0.14            | $4.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $7.3 \cdot 10^{-4}$                | 0.07            |
| Гипс            | 18.1                        | 0.1                     | 5.84            | Не опр.                 | Не опр.         | 0.024                              | 3.1             |
| Арсенопирит     | 19.7                        | $1.9 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $1.1 \cdot 10^{-5}$     | < 0.01          | $8.8 \cdot 10^{-6}$                | < 0.01          |
| Кизерит         | 23.2                        | 0.0029                  | 0.22            | Не опр.                 | Не опр.         | $6.7 \cdot 10^{-4}$                | 0.11            |
| Ангидрит        | 23.3                        | 0.19                    | 14.28           | Не опр.                 | Не опр.         | 0.045                              | 7.49            |
| Сфалерит        | 32.9                        | $1.9 \cdot 10^{-5}$     | < 0.01          | $5.5 \cdot 10^{-5}$     | 0.02            | $4.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.01            |
| Халькопирит     | 34.9                        | $1.6 \cdot 10^{-4}$     | 0.018           | $9.3 \cdot 10^{-5}$     | 0.04            | $1.1 \cdot 10^{-4}$                | 0.03            |
| Пентландит      | 35                          | $9 \cdot 10^{-7}$       | < 0.01          | $1.1 \cdot 10^{-4}$     | 0.04            | $8.4 \cdot 10^{-5}$                | 0.02            |
| Пирротин        | 38.5                        | 0.0045                  | 0.56            | 0.036                   | 15.4            | 0.029                              | 7.98            |
| Молибденит      | 40                          | $7.9 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $1.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.01            | $1.2 \cdot 10^{-5}$                | < 0.01          |
| Пирит           | 53.5                        | 0.09                    | 15.59           | 0.055                   | 32.69           | 0.063                              | 24.08           |
| Марказит        | 53.4                        | 0.0022                  | 0.38            | $8.3 \cdot 10^{-4}$     | 0.49            | 0.0012                             | 0.46            |
| Сера самородная | 100                         | $3.8 \cdot 10^{-4}$     | 0.12            | Не опр.                 | Не опр.         | $9 \cdot 10^{-5}$                  | 0.06            |
| Сумма           |                             |                         | 37.20           |                         | 48.69           |                                    | 43.47           |

Таблица 7.4

**Доли масс S (%), находящиеся в максиминералах осадочных пород континентальной коры**

| Минералы        | Пески и песчаники | Глины и сланцы | Карбонатные породы | Эвапориты | Осадочные породы |
|-----------------|-------------------|----------------|--------------------|-----------|------------------|
| Целестин        | Не опр.           | 0.05           | 0.13               | Не опр.   | 0.04             |
| Ярозит          | 0.11              | 0.11           | Не опр.            | Не опр.   | 0.07             |
| Барит           | 0.51              | 0.1            | 0.08               | Не опр.   | 0.13             |
| Гипс            | Не опр.           | 0.7            | 5.07               | 27.12     | 6.03             |
| Кизерит         | Не опр.           | Не опр.        | Не опр.            | 1.43      | 0.22             |
| Ангидрит        | 3.68              | 1.94           | Не опр.            | 69.81     | 14.89            |
| Пирит           | 50.07             | 22.29          | 21.4               | Не опр.   | 14.86            |
| Марказит        | Не опр.           | 0.74           | Не опр.            | Не опр.   | 0.39             |
| Сера самородная | Не опр.           | 0.14           | 0.4                | Не опр.   | 0.13             |
| Сумма           | 54.37             | 26.07          | 27.08              | 98.36     | 36.76            |

Согласно полученным данным, в верхней части континентальной коры в собственных минералах S сконцентрировано 43.6% ее массы, в том числе в максиминералах – 43.47% (табл. 7.3), в скаполитах – 0.12 и в нозеане – 0.01. Роль максиминералов как носителей S в осадочном слое несколько меньше, а в гранитно-гнейсовом – несколько больше. В осадочном слое главные носители S пирит и ангидрит, а в гранитно-гнейсовом – пирит и пирротин. В ассоциации всех осадочных пород суммарная доля S, сконцентрированная в максиминералах (табл. 7.4) несколько меньше,

Таблица 7.5

**Доли масс S (%), находящиеся в максиминералах вулканогенных  
пород осадочного слоя континентальной коры**

| Минералы    | Породы  |         |          |                   |
|-------------|---------|---------|----------|-------------------|
|             | Кислые  | Средние | Основные | Вулканиды в целом |
| Галенит     | 0.05    | 0.03    | 0.01     | 0.02              |
| Барит       | 0.71    | 0.58    | Не опр.  | 0.26              |
| Арсенопирит | 0.03    | < 0.01  | Не опр.  | < 0.01            |
| Борнит      | Не опр. | Не опр. | 0.04     | 0.02              |
| Реальгар    | 0.02    | 0.01    | < 0.01   | 0.01              |
| Сфалерит    | 0.03    | 0.03    | 0.07     | 0.05              |
| Ковеллин    | 0.02    | Не опр. | Не опр.  | < 0.01            |
| Халькопирит | 0.18    | 0.49    | 0.49     | 0.51              |
| Кубанит     | < 0.01  | Не опр. | 0.15     | 0.09              |
| Пирротин    | Не опр. | < 0.01  | 27.11    | 16.18             |
| Аурипигмент | 0.07    | 0.03    | 0.01     | 0.02              |
| Молибденит  | 0.03    | Не опр. | Не опр.  | < 0.01            |
| Пирит       | 46.12   | 52.75   | 37.68    | 43.42             |
| Сумма       | 46.56   | 53.34   | 65.56    | 60.33             |

Таблица 7.6

**Доли масс S (%), находящиеся в максиминералах магматических пород  
гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы    | Граниты | Гранодио-<br>риты | Базиты  | Сиениты | Ультраба-<br>зиты | Магматические<br>породы в целом |
|-------------|---------|-------------------|---------|---------|-------------------|---------------------------------|
| Галенит     | 0.01    | 0.09              | < 0.01  | 0.01    | < 0.01            | 0.02                            |
| Целестин    | < 0.01  | 0.04              | < 0.01  | < 0.01  | < 0.01            | 0.01                            |
| Арсенопирит | 0.04    | 0.03              | < 0.01  | < 0.01  | < 0.01            | 0.02                            |
| Сфалерит    | 0.04    | 0.22              | < 0.01  | < 0.01  | < 0.01            | 0.07                            |
| Пентландит  | Не опр. | Не опр.           | 1.38    | Не опр. | 0.12              | 0.37                            |
| Халькопирит | 0.14    | 0.09              | 0.87    | 0.03    | 0.02              | 0.35                            |
| Пирротин    | 7.7     | 17.97             | 7.7     | 25.67   | 0.88              | 9.73                            |
| Троилит     | Не опр. | Не опр.           | Не опр. | 0.18    | Не опр.           | < 0.01                          |
| Молибденит  | 0.04    | 0.05              | < 0.01  | < 0.01  | < 0.01            | 0.03                            |
| Пирит       | 35.67   | 35.67             | 26.75   | 17.83   | 60.8              | 33.79                           |
| Марказит    | 0.78    | 10.32             | Не опр. | 0.89    | Не опр.           | 2.53                            |
| Сумма       | 44.41   | 64.48             | 36.71   | 44.61   | 61.82             | 46.91                           |

чем в верхней части континентальной коры, но внутри этой ассоциации вариации роли максиминералов максимальные. Полуколичественные и качественные описания минерального состава эвапоритов дают основания для заключения о том, что практически вся масса S здесь сконцентрирована в сульфатах. В глинах, сланцах и карбонатных породах в максиминералах сконцентрирована только 1/4 массы S. Вулканиды осадочного слоя в целом характеризуются повышенной ролью максиминералов как носителей S (табл. 7.5). В гранитно-гнейсовом слое роль макси-

Таблица 7.7

**Доли масс S (%), находящиеся в максиминералах параметаморфических пород континентальной коры**

| Минералы    | Метапесчаники | Парасланцы | Карбонатные породы | Железистые породы | В целом |
|-------------|---------------|------------|--------------------|-------------------|---------|
| Сфалерит    | 0.08          | 0.02       | Не опр.            | Не опр.           | 0.02    |
| Халькопирит | 0.03          | < 0.01     | Не опр.            | Не опр.           | 0.01    |
| Пентландит  | Не опр.       | 0.04       | Не опр.            | Не опр.           | 0.03    |
| Пирротин    | 7.26          | 26.95      | 18.58              | Не опр.           | 25.41   |
| Пирит       | 50.47         | 42.8       | 11.73              | 49.28             | 40.66   |
| Сумма       | 5.84          | 69.81      | 30.3               | 49.28             | 66.13   |

Таблица 7.8

**Доли масс S (%), находящиеся в максиминералах ортометаморфических пород**

| Минералы    | Гранито-гнейсы | Метариолиты | Метаандезиты | Метабазиты | В целом |
|-------------|----------------|-------------|--------------|------------|---------|
| Галенит     | < 0.01         | 0.04        | Не опр.      | < 0.01     | < 0.01  |
| Арсенопирит | < 0.01         | Нвопр.      | 0.03         | < 0.01     | < 0.01  |
| Сфалерит    | 0.01           | 0.02        | < 0.01       | < 0.01     | < 0.01  |
| Ковеллин    | Не опр.        | 0.02        | Не опр.      | 0.03       | < 0.01  |
| Халькопирит | < 0.01         | 0.18        | 0.01         | 0.28       | 0.02    |
| Пирротин    | 3.63           | 3.21        | 12.83        | 11.55      | 5.01    |
| Молибденит  | < 0.01         | 0.02        | < 0.01       | < 0.01     | < 0.01  |
| Пирит       | 20.19          | 50.53       | 53.5         | 32.1       | 22.47   |
| Марказит    | Не опр.        | 14.09       | Не опр.      | 5.34       | 0.75    |
| Сумма       | 23.83          | 68.11       | 66.37        | 49.3       | 28.25   |

минералов в ассоциациях горных пород: магматических – средняя (табл. 7.6), параметаморфических – максимальная (табл. 7.7), ортометаморфических – минимальная (табл. 7.8). Роль прочих собственных минералов S наиболее значительна в сиенитах. Здесь, согласно полученным данным, 43.33% массы S сконцентрировано в нозеане. В метаморфических породах заметна роль скаполитов. Сконцентрированные в них массы S: в метакарбонатных породах – 1.67%, в метаандезитах – 9.5, в метабазитах – 2.85.

### 7.2.3. Обсуждение полученных данных

Согласно результатам расчетов, в верхней части континентальной коры суммарная доля массы S, сконцентрированная в ее собственных минералах, практически соответствуют той, которая была определена раньше для верхней части всей земной коры (Григорьев, 1999), что свидетельствует в пользу корректности проведенных расчетов. Но в обоих случаях исходными данными были опубликованные в литературе результаты ми-

нералогических анализов горных пород ( преимущественно количественных). Преобладающие методы количественных определений содержаний акцессорных минералов в горных породах дают возможность учета лишь частиц крупнее 10–50 мкм, поэтому исходные данные о содержании сульфидов и сульфатов в горных породах (за исключением эвапоритов) преуменьшены. В какой мере этот недостаток компенсирован отмеченной выше коррекцией результатов расчетов, не ясно. Поэтому подойдем к вопросу с другой стороны.

В начале XX в. в качестве аксиомы принималось представление о том, что в земной коре вся масса S сконцентрирована в собственных минералах. В частности, А.Е. Ферсман (1933) при определении среднего минерального состава земной коры пересчитал всю S на пирит. Это представление, как казалось, было подтверждено расчетом минерального баланса S в нозеан-нефелиновом сиените Ловозерского массива (Кузнецова, 1976). Заметим, однако, что валовое содержание S в исследованной пробе в 5 раз больше кларкового. В конце XX в. В.В. Иванов (1994) обобщил данные о содержании S в кварце и эндогенных порообразующих силикатах. Судя по этим результатам, в гранитно-гнейсовом слое в отмеченных минералах может находиться не больше 10% массы S. Но эти данные некорректны. Нет сведений о содержании S в горных породах, из которых были выделены исследованные минералы. Некоторую ясность в вопрос вносят полученные автором результаты расчета минеральных балансов S в пяти пробах метасоматитов из скарновых месторождений Турьинской группы на Урале. Количественный минералогический анализ проведен по методике, позволяющей приблизительно учесть и частицы сульфидов мельче 10 мкм (Григорьев, 1999). Здесь в пробе В-8606, характеризующейся пониженным содержанием S, в сульфидах сконцентрировано 72%, а 25% масс S рассеяно в преобладающей – силикате-андрадите. В пробах, где содержание S повышенное, в сульфидах сконцентрировано 89–99% масс S. Эти данные не дают оснований для заключений о полной концентрации S в ее собственных минералах, но они же свидетельствуют о том, что приведенные выше оценки роли сульфидов и сульфатов как носителей S можно рассматривать только в качестве минимально возможных.

#### 7.2.4. Выводы

Среднее содержание S в верхней части континентальной коры 0.14%, осадочных породах 0.36, параметаморфических 0.1. В осадочных и параметаморфических породах сосредоточено 74.3% всей массы S, имеющейся в верхней части континентальной коры.

В верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 43.47% масс S, в том числе, %: в пирите – 24.08, пирротине – 7.98, ангидрите – 7.49, гипсе – 3.1, марказите – 0.46, кизерите – 0.11, барите – 0.07, сере самородной – 0.06, ярозите – 0.04, халькопирите – 0.03, по 0.02 – в целестине – 0.02, в пентландите – 0.02, сфалерите – 0.01. Эти цифры минимально возможные.

### 7.3. СЕЛЕН

#### 7.3.1. Среднее содержание и распределение масс Se в верхней части континентальной коры

Данные о среднем содержании Se в горных породах верхней части континентальной коры и ее слоях (см. табл. 7.1) в основном прежние (Григорьев, 2002, 2003б), но с небольшими поправками, компенсирующими допущенную в прошлом погрешность. Приводимая здесь величина среднего содержания Se в верхней части континентальной коры  $1.5 \cdot 10^{-5} \%$  соответствует наибольшей из величин  $5 \cdot 10^{-6}$ – $1.5 \cdot 10^{-5} \%$ , публиковавшихся в последние 50 лет (Rudnick, Gao, 2004). Наиболее высоким средним содержанием Se характеризуются осадочные и параметаморфические породы, в которых сконцентрировано 78.01% всей массы Se. Селен «избыточный элемент». Его среднее содержание в континентальных осадочных породах ( $2.7 \cdot 10^{-5} \%$ ) почти в 2 раза больше того, которое могло быть заимствовано за счет выветривающихся пород гранитно-гнейсового слоя современного состава (расчет изоалюминиевым методом).

#### 7.3.2. О вероятной роли максиминералов как носителей Se

Минимальное для максиминералов содержание Se 0.02% (Григорьев, 1999). Среди минералов, учтенных при количественных минералогических анализах горных пород, только киноварь и висмутин характеризуются средним содержанием Se  $> 0.02\%$  (Иванов, 1996, кн. 3). Пока только они могут считаться максиминералами Se в границах всей верхней части континентальной коры. По расчету, роль максиминералов как носителей Se в целом минимальная (0.0011% всей его массы). Наибольшее содержание максиминералов наблюдается в гранодиоритах (табл. 7.9).

Таблица 7.9

Роль максиминералов как носителей Se в верхней части континентальной коры

| Породы                                    | Содержание минералов, % |                     | Доли масс Se, % |          |        |
|-------------------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------|----------|--------|
|                                           | Киноварь                | Висмутин            | Киноварь        | Висмутин | Всего  |
| Карбонатные породы                        | $1.6 \cdot 10^{-7}$     | Не обн.             | 0.0004          | 0        | 0.0004 |
| Кислые вулканы                            | $1 \cdot 10^{-6}$       | Не обн.             | 0.007           | 0        | 0.007  |
| Средние вулканы                           | $1 \cdot 10^{-6}$       | Не обн.             | 0.01            | 0        | 0.01   |
| Граниты                                   | $4 \cdot 10^{-8}$       | $1 \cdot 10^{-6}$   | 0.0004          | 0.021    | 0.0214 |
| Гранодиориты                              | $3 \cdot 10^{-7}$       | Не обн.             | 0.0023          | 0        | 0.0023 |
| Базиты                                    | $1 \cdot 10^{-7}$       | Не обн.             | 0.0009          | 0        | 0.0009 |
| Сиеиты                                    | Не обн.                 | $5 \cdot 10^{-7}$   | 0               | 0.015    | 0.015  |
| Ультрабазиты                              | $1 \cdot 10^{-7}$       | Не обн.             | 0.0012          | 0        | 0.0012 |
| Парагнейсы и парасланцы                   | Не обн.                 | $5 \cdot 10^{-8}$   | 0               | 0.0004   | 0.0004 |
| Гранито-гнейсы                            | $1 \cdot 10^{-7}$       | Не обн.             | 0.0009          | 0        | 0.0009 |
| Метариолиты                               | $2 \cdot 10^{-8}$       | Не обн.             | 0.0001          | 0        | 0.0001 |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | $5.9 \cdot 10^{-8}$     | $9.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.0002          | 0.0009   | 0.0011 |

### 7.3.3. Выводы

В геохимическом и минералого-геохимическом отношении Se изучен недостаточно. По имеющимся данным, его среднее содержание в верхней части континентальной коры  $1.5 \cdot 10^{-5} \%$ , в осадочных породах  $2.7 \cdot 10^{-5}$ , в параметаморфических породах –  $1.8 \cdot 10^{-5}$ . В осадочных и параметаморфических породах сосредоточено 78.01% масс Se в верхней части континентальной коры.

Согласно полученным данным, в верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 0.0011% масс Se, в том числе 0.0009% в висмутине и 0.0002 – в киновари. Все приведенные цифры требуют уточнения.

**8.1. СРЕДНЕЕ СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС  
F, Cl, Br, J В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ**

Приводимые величины среднего содержания галогенов в горных породах (табл. 8.1) преимущественно соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2002, 2003б). Вновь определены содержания F в метаандезитах, по данным (Макрыгина и др., 2000), Br в эвапоритах, по данным (Handbook..., 1974), J в парагнейсах и парасланцах – среднее по А.П. Виноградову (1957), Я. Мурамацу и К.Х. Ведеполу (Muramatsu, Wedepohl, 1998). Установлена стандартная тенденция: чем меньше кларковое содержание элемента, тем меньше влияние состава горных пород на его распределение. Вариации средних коэффициентов концентрации в горных породах: Cl 0.01–295, F 0.2–1.8, Br 0.08–5.2, J 0.4–2.4. В этом ряду выделяется только F.

Масса F распределена почти пропорционально массам континентальных пород. Больше половины масс F (60.05%) находится в метаморфических породах. Значительная часть масс остальных галогенов сконцентрирована в осадочных породах, %: Cl – 87.64, Br – 85.31, J – 44.8. Распределение F в верхней части континентальной коры почти соответствует требованиям геохимического баланса. Его среднее содержание в осадочных породах 0.047% лишь незначительно больше 0.042% – того, которое могло быть заимствовано при выветривании современного гранитно-гнейсового слоя. Остальные галогены избыточные. Их среднее содержание в континентальных осадочных породах превышает заимствованное: Cl в 36 раз, Br – в 29, J – почти в 5 раз (определение изоалюминиевым методом), причем степень обособления (концентрации) Cl в пределах верхней части континентальной коры очень велика. Почти 80% его массы сконцентрировано в эвапоритах, масса которых составляет всего 0.26% массы верхней части континентальной коры. Вероятно, еще большей потенциальной тенденцией к обособлению характеризуются Br и J, однако в верхней части континентальной коры нет условий для полной реализации этой тенденции. Значительные части масс Br и J, скорее всего, сосредоточены в гидросфере, биосфере и атмосфере.

**8.2. ДОЛИ МАСС F, СКОНЦЕНТРИРОВАННЫЕ  
В СОБСТВЕННЫХ МИНЕРАЛАХ**

В континентальной коре главные минералы-концентраторы F слюды, амфиболы и апатит, но содержание  $F > 1.6\%$  (минимальное для максиминералов) в этих минералах встречается относительно редко (Холоднов, Буш-



Таблица 8.1

## Распределение масс галогенов (%) в ассоциации горных пород верхней части континентальной коры

| Горные породы                             | Масса пород  | Среднее содержание |              |                          |                            | Доли масс    |              |               |               |
|-------------------------------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------------|----------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
|                                           |              | F                  | Cl           | Br                       | J                          | F            | Cl           | Br            | J             |
| Пески и песчаники                         | 5.11         | 0.033              | 0.059        | 0.0048                   | 1·10 <sup>-4</sup>         | 3.29         | 2.05         | 22.3          | 10.43         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4         | 0.061              | 0.085        | 0.0057                   | 1.2·10 <sup>-4</sup>       | 12.39        | 6.01         | 53.89         | 25.47         |
| Карбонатные породы                        | 3.85         | 0.033              | 0.053        | 5.8·10 <sup>-4</sup>     | 1.1·10 <sup>-4</sup>       | 2.48         | 1.39         | 2.03          | 8.64          |
| Кремнистые породы                         | 0.33         | Не опр.            | Не опр.      | Не опр.                  | Не опр.                    | Не опр.      | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.       |
| Эвапориты                                 | 0.26         | 0.024              | 44.21        | 0.03                     | 4.8·10 <sup>-5</sup>       | 0.12         | 78.19        | 7.09          | 0.26          |
| Кислые вулканиты                          | 0.44         | 0.051              | 0.018        | 2·10 <sup>-4*</sup>      | 2·10 <sup>-5*</sup>        | 0.44         | 0.05         | 0.08*         | 0.18*         |
| Средние вулканиты                         | 1.13         | 0.05               | 0.025        | 3·10 <sup>-4*</sup>      | 3·10 <sup>-5*</sup>        | 1.1          | 0.19         | 0.31*         | 0.69*         |
| Основные вулканиты                        | 2.11         | 0.046              | 0.033        | 4.1·10 <sup>-4</sup>     | 6·10 <sup>-5</sup>         | 1.9          | 0.47         | 0.79          | 2.58          |
| Граниты                                   | 8.21         | 0.082              | 0.019        | 1.7·10 <sup>-4</sup>     | 8·10 <sup>-5</sup>         | 13.15        | 1.06         | 1.27          | 13.4          |
| Гранодиориты                              | 3.38         | 0.056              | 0.016        | 4.3·10 <sup>-4</sup>     | 5·10 <sup>-5</sup>         | 3.7          | 0.37         | 1.32          | 3.45          |
| Базиты                                    | 1.5          | 0.04               | 0.02         | 3.5·10 <sup>-4</sup>     | 5·10 <sup>-5</sup>         | 1.17         | 0.2          | 0.48          | 1.53          |
| Сиениты                                   | 0.05         | 0.12               | 0.047        | 2.7·10 <sup>-4</sup>     | 7·10 <sup>-5</sup>         | 0.12         | 0.02         | 0.01          | 0.07          |
| Ультрабазиты                              | 0.05         | 0.01               | 0.007        | 9·10 <sup>-5</sup>       | 3·10 <sup>-5</sup>         | 0.01         | <0.01        | <0.01         | 0.03          |
| Метапесчаники                             | 2.92         | 0.03               | 0.025        | 1·10 <sup>-4*</sup>      | 5·10 <sup>-5</sup>         | 1.71         | 0.5          | 0.27*         | 2.98          |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56        | 0.065              | 0.022        | 2·10 <sup>-4</sup>       | 2·10 <sup>-5</sup>         | 38.8         | 4.57         | 5.56          | 12.47         |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13         | 0.047              | 0.03         | 1·10 <sup>-4*</sup>      | 3·10 <sup>-5</sup>         | 1.04         | 0.23         | 0.1*          | 0.69          |
| Железистые породы                         | 0.38         | 0.016              | 0.045        | Не опр.                  | Не опр.                    | 0.12         | 0.12         | Не опр.       | Не опр.       |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21        | 0.029              | 0.021        | 2·10 <sup>-4*</sup>      | 3·10 <sup>-5</sup>         | 13.15        | 3.32         | 4.22*         | 14.21         |
| Метариолиты                               | 0.66         | 0.05               | 0.01         | 2·10 <sup>-4*</sup>      | 3·10 <sup>-5</sup>         | 0.65         | 0.05         | 0.12*         | 0.4*          |
| Метаандезиты                              | 1.03         | 0.058              | 0.02*        | 2·10 <sup>-4*</sup>      | 3·10 <sup>-5</sup>         | 1.17         | 0.14*        | 0.19*         | 0.63*         |
| Метабазиты                                | 3.29         | 0.053              | 0.03         | 2·10 <sup>-4*</sup>      | 3·10 <sup>-5</sup>         | 3.41         | 0.67         | 0.6*          | 2.01*         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>   | <b>0.051</b>       | <b>0.15</b>  | <b>0.0011</b>            | <b>4.9·10<sup>-5</sup></b> | <b>99.92</b> | <b>99.6</b>  | <b>100.63</b> | <b>100.12</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95        | 0.047              | 0.65         | 0.0047                   | 1.1·10 <sup>-4</sup>       | 18.28        | 87.64        | 85.31         | 44.8          |
| Вулканиты осадочного слоя                 | 3.68         | 0.048              | 0.029        | 0.0004*                  | 5·10 <sup>-5*</sup>        | 3.44         | 0.71         | 1.18*         | 3.45*         |
| <b>Осадочный слой</b>                     | <b>23.63</b> | <b>0.047</b>       | <b>0.55</b>  | <b>4·10<sup>-4</sup></b> | <b>1·10<sup>-4</sup></b>   | <b>21.72</b> | <b>88.35</b> | <b>86.49</b>  | <b>48.25</b>  |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19        | 0.071              | 0.018        | 2.6·10 <sup>-4</sup>     | 6.9·10 <sup>-5</sup>       | 18.15        | 1.65         | 3.08          | 18.48         |
| Параметаморфиты                           | 34.99        | 0.061              | 0.023        | 2·10 <sup>-4</sup>       | 2.3·10 <sup>-5</sup>       | 41.67        | 5.42         | 5.93          | 16.14         |
| Ортометаморфиты                           | 28.19        | 0.033              | 0.022        | 2·10 <sup>-4*</sup>      | 3·10 <sup>-5*</sup>        | 18.38        | 4.18         | 5.13*         | 17.25*        |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой</b>            | <b>76.37</b> | <b>0.052</b>       | <b>0.022</b> | <b>2·10<sup>-4</sup></b> | <b>3·10<sup>-5</sup></b>   | <b>78.2</b>  | <b>11.25</b> | <b>14.14</b>  | <b>51.87</b>  |

\* Здесь и в последующих таблицах – значения, предполагаемые при отсутствии или незначительном количестве исходных данных.

Таблица 8.2

**Роль собственных минералов как носителей F в верхней части континентальной коры**

| Минералы   | Содержание F в минералах, % | Осадочный слой          |                | Гранитно-гнейсовый слой |                | Верхняя часть континентальной коры |                |
|------------|-----------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|
|            |                             | Содержание минералов, % | Доли масс F, % | Содержание минералов, % | Доли масс F, % | Содержание минералов, %            | Доли масс F, % |
| Апатит     | 1.9                         | 0.014                   | 0.57           | 0.16                    | 5.85           | 0.13                               | 4.84           |
| Клиногумит | 2.39                        | Не опр.                 | Не опр.        | 0.002                   | 0.09           | 0.0015                             | 0.07           |
| Ловенит    | 3.86                        | Не опр.                 | Не опр.        | $3.3 \cdot 10^{-7}$     | $< 0.01$       | $2.5 \cdot 10^{-7}$                | $< 0.01$       |
| Гумит      | 4                           | Не опр.                 | Не опр.        | 0.0013                  | 0.1            | 0.001                              | 0.08           |
| Хондродит  | 6.82                        | Не опр.                 | Не опр.        | $2.9 \cdot 10^{-5}$     | $< 0.01$       | $2.2 \cdot 10^{-5}$                | $< 0.01$       |
| Бастнезит  | 8.2                         | Не опр.                 | Не опр.        | $4.2 \cdot 10^{-4}$     | 0.07           | $3.2 \cdot 10^{-4}$                | 0.05           |
| Топаз      | 19.67                       | $1.6 \cdot 10^{-6}$     | $< 0.01$       | $6 \cdot 10^{-4}$       | 0.23           | $4.6 \cdot 10^{-4}$                | 0.18           |
| Флюорит    | 48.33                       | $1.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.02           | 0.0028                  | 2.6            | 0.0022                             | 2.08           |
| Сумма      |                             | 0.014                   | 0.59           | 0.167                   | 8.94           | 0.135                              | 7.3            |

Таблица 8.3

**Доли масс F (%), сконцентрированные в собственных минералах в осадочных породах континентальной коры**

| Минералы | Пески и песчаники              | Глины и сланцы | Карбонатные породы             | Эвапориты                  | Осадочные породы               |
|----------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Апатит   | 2.82 (0.049)                   | 0.07 (0.0022)  | Не опр.                        | 0.01 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.57 (0.014)                   |
| Топаз    | $< 0.01$ ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.        | Не опр.                        | Не опр.                    | $< 0.01$ ( $2 \cdot 10^{-8}$ ) |
| Флюорит  | $< 0.01$ ( $5 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.        | $< 0.01$ ( $5 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                    | $< 0.01$ ( $2 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Сумма    | 2.82 (0.049)                   | 0.07 (0.0022)  | $< 0.01$ ( $5 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.01 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.57 (0.014)                   |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – среднее содержание минералов, %.

ляков, 2002). Масштабы изоморфного замещения гидроксильных групп на F в некоторых других минералах-концентраторах сильно варьируют, поэтому отнесение многих минералов и их разновидностей к собственным или чужим в отношении F субъективно. Здесь к собственным в отношении F отнесены минералы, в которых среднее содержание F  $> 1.6\%$ . Среднее содержание наиболее известных собственных минералов F в горных породах рассчитано по опубликованным в литературе результатам количественных минералогических анализов более чем 2500 проб и образцов горных пород. Источники данных приведены в разделе 7.2.2.

Согласно полученным данным, в верхней части континентальной коры в собственных минералах сконцентрировано 7.3% массы F (табл. 8.2). Главная роль принадлежит апатиту (4.84% массы F). На втором месте флюорит (2.08% массы F). Роль флюорита соответствует той, которая раньше была определена для верхней части всей земной коры (2% массы F) (Григорьев, 1999). В осадочном слое роль собственных минералов минимальная, особенно в глинах и сланцах (табл. 8.3). В вулканитах осадочного слоя она тоже невелика и снижается от кислых вулканитов к основным (табл. 8.4). В гранитно-гнейсовом слое роль собственных минералов максимальна в сиенитах (табл. 8.5), железистых породах и метапесчани-

Таблица 8.4

**Доли масс F (%), сконцентрированные в собственных минералах  
в вулканических породах осадочного слоя континентальной коры**

| Минералы | Породы                     |             |             |                                |
|----------|----------------------------|-------------|-------------|--------------------------------|
|          | Кислые                     | Средние     | Основные    | Вулканиды в целом              |
| Апатит   | 0.41 (0.011)               | 1.14 (0.03) | 0.41 (0.01) | 0.63 (0.016)                   |
| Топаз    | 0.04 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | Не опр.     | Не опр.     | $< 0.01$ ( $1 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Флюорит  | 0.76 ( $8 \cdot 10^{-4}$ ) | Не опр.     | Не опр.     | 0.1 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )      |
| Сумма    | 1.21 (0.012)               | 1.14 (0.03) | 0.41 (0.01) | 0.74 (0.016)                   |

Таблица 8.5

**Доли масс F (%), сконцентрированные в собственных минералах  
в магматических породах гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы  | Граниты                      | Гранодиориты                   | Базиты                         | Сиениты       | Ультрабазиты | Магматические породы в целом |
|-----------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------|--------------|------------------------------|
| Апатит    | 1.39 (0.06)                  | 2.38 (0.07)                    | 4.75 (0.1)                     | 1.74 (0.11)   | 9.5 (0.05)   | 1.82 (0.068)                 |
| Хондродит | 0.02 ( $2.7 \cdot 10^{-4}$ ) | Не опр.                        | Не опр.                        | Не опр.       | Не опр.      | 0.02 ( $1.7 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Бастнезит | 0.05 ( $4.7 \cdot 10^{-4}$ ) | Не опр.                        | Не опр.                        | Не опр.       | Не опр.      | 0.03 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Топаз     | 0.01 ( $3.6 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.01 ( $3.4 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                        | Не опр.       | Не опр.      | 0.01 ( $3.1 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Флюорит   | 3.54 (0.006)                 | $0.39$ ( $4.5 \cdot 10^{-4}$ ) | $< 0.01$ ( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | 18.93 (0.047) | Не опр.      | 2.72 (0.004)                 |
| Сумма     | 5.01 (0.067)                 | 2.78 (0.07)                    | 4.75 (0.1)                     | 20.67 (0.157) | 9.5 (0.05)   | 4.6 (0.072)                  |

Таблица 8.6

**Доли масс F (%), сконцентрированные в собственных минералах  
в параметаморфических породах**

| Минералы   | Метапесчаники | Парасланцы    | Метакарбонаты | Железистые породы | Параметаморфиты в целом |
|------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------------|
| Апатит     | 14.57 (0.23)  | 5.85 (0.2)    | 4.85 (0.12)   | 11.88 (0.1)       | 6.23 (0.2)              |
| Клиногумит | Не опр.       | Не опр.       | 5.09 (0.1)    | 14.94 (0.1)       | 0.17 (0.0043)           |
| Гумит      | Не опр.       | Не опр.       | 7.66 (0.09)   | Не опр.           | 0.19 (0.0029)           |
| Топаз      | Не опр.       | 0.45 (0.0015) | Не опр.       | Не опр.           | 0.42 (0.0013)           |
| Флюорит    | 4.35 (0.0027) | 3.72 (0.005)  | Не опр.       | Не опр.           | 3.64 (0.0046)           |
| Сумма      | 18.92 (0.233) | 10.02 (0.207) | 17.6 (0.31)   | 26.82 (0.2)       | 10.65 (0.213)           |

Таблица 8.7

**Доли масс F (%), сконцентрированные в собственных минералах  
в ортометаморфических породах**

| Минералы  | Гранито-гнейсы                 | Метариолиты                | Метаандезиты | Метабазиты                     | Ортометаморфические породы в целом |
|-----------|--------------------------------|----------------------------|--------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Апатит    | 11.79 (0.18)                   | 2.89 (0.076)               | 1.47 (0.045) | 1.43 (0.04)                    | 9.21 (0.16)                        |
| Бастнезит | 0.34 (0.0012)                  | Не опр.                    | Не опр.      | Не опр.                        | 0.25 (0.001)                       |
| Топаз     | $< 0.01$ ( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                    | Не опр.      | Не опр.                        | $< 0.01$ ( $3.3 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Флюорит   | 0.03 ( $2 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.68 ( $7 \cdot 10^{-4}$ ) | Не опр.      | $< 0.01$ ( $3 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.05 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )       |
| Сумма     | 12.16 (0.181)                  | 3.57 (0.077)               | 1.47 (0.045) | 1.43 (0.04)                    | 9.51 (0.161)                       |

ках (табл. 8.6). Среди ортометаморфических пород повышенным количеством собственных минералов отличаются гранито-гнейсы (табл. 8.7). В большинстве горных пород наибольшая роль среди максиминералов принадлежит апатиту. Исключения составляют граниты и сиениты (здесь на первом месте флюорит), а также метакарбонатные и железистые породы (здесь наибольшая роль принадлежит гумиту и клиногумиту). Заметим, что апатит встречается в карбонатных породах осадочного слоя, но в известных автору результатах количественных минералогических анализов он не отмечен.

### 8.3. ДОЛИ МАСС Cl, СКОНЦЕНТРИРОВАННЫЕ В СОБСТВЕННЫХ МИНЕРАЛАХ

Среднее содержание собственных минералов Cl в эвапоритах определено приблизительно на основании качественных и полуколичественных минералогических анализов (Юшкин, 1989; Лобанова, 1969; Кольцова, Яржемский, 1969). Метод – пересчет химического состава эвапоритов на минеральный состав. Данные о наличии и вариациях содержания собственных минералов Cl в других горных породах заимствованы из литературы. Источники данных приведены в разделе 7.2.2.

Согласно полученным данным, в верхней части континентальной коры в собственных минералах сконцентрировано 73.04% массы Cl (табл. 8.8). Главная роль принадлежит галиту (72.58% массы Cl), из остальных минералов наиболее существенную роль играют сильвин и скаполиты (0.21 и 0.19% массы Cl соответственно). Заметим, что к собственным минералам Cl принято относить только некоторые скаполиты (мариалиты), но пока возможен лишь совместный учет всех скаполитов. Среднее же содержание Cl в скаполитах 1.61%, что меньше минимального для максиминералов – 2.8%. В этом отношении Cl похож на главные химические элементы, у которых к максиминералам относится только часть собственных минералов. В осадочном слое очень большая роль собственных минералов как носителей Cl обеспечивается только эвапо-

Таблица 8.8

#### Роль собственных минералов как носителей Cl в верхней части континентальной коры

| Минералы  | Содержание Cl в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|-----------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|           |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Cl, % | Содержание минералов, % | Доли масс Cl, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Cl, % |
| Скаполиты | 1.61                         | Не опр.                 | Не опр.         | 0.023                   | 1.68            | 0.018                              | 0.19            |
| Содалит   | 6.55                         | Не опр.                 | Не опр.         | $8.4 \cdot 10^{-5}$     | 0.025           | $6.4 \cdot 10^{-5}$                | < 0.01          |
| Бишофит   | 34                           | $1.1 \cdot 10^{-4}$     | 0.01            | Не опр.                 | Не опр.         | $2.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.01            |
| Сильвин   | 47                           | 0.0028                  | 0.24            | Не опр.                 | Не опр.         | $6.6 \cdot 10^{-4}$                | 0.21            |
| Карналлит | 55                           | $5.5 \cdot 10^{-4}$     | 0.06            | Не опр.                 | Не опр.         | $1.3 \cdot 10^{-4}$                | 0.05            |
| Галит     | 57.3                         | 0.81                    | 84.39           | Не опр.                 | Не опр.         | 0.19                               | 72.58           |
| Сумма     |                              | 0.813                   | 84.7            | 0.023                   | 1.705           | 0.209                              | 73.04           |

**Доли масс Cl, сконцентрированные в собственных минералах и горных породах, составляющих верхнюю часть континентальной коры, %**

| Минералы  | Эвапориты    | Сиениты      | Метакарбонаты | Метаандезиты | Метабазиты |
|-----------|--------------|--------------|---------------|--------------|------------|
| Скаполиты | Не опр.      | Не опр.      | 21.47 (0.4)   | 24.15 (0.3)  | 16.1 (0.3) |
| Содалит   | Не опр.      | 18.12 (0.13) | Не опр.       | Не опр.      | Не опр.    |
| Бишофит   | 0.01 (0.01)  | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.      | Не опр.    |
| Сильвин   | 0.27 (0.25)  | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.      | Не опр.    |
| Карналлит | 0.06 (0.05)  | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.      | Не опр.    |
| Галит     | 95.91 (74)   | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.      | Не опр.    |
| Сумма     | 96.25(74.31) | 18.12 (0.13) | 21.47 (0.4)   | 24.15 (0.3)  | 16.1 (0.3) |

ритами. В гранитно-гнейсовом слое в целом эта роль относительно мала. Среди эндогенных горных пород значительной ролью собственных минералов Cl характеризуются только сиениты и некоторые метаморфические породы (табл. 8.9).

#### 8.4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Данные о среднем содержании галогенов в большинстве горных пород нуждаются в уточнении. Особенно это касается Вг и J, поэтому и данные о распределении масс галогенов в ассоциации горных пород, представляющих верхнюю часть континентальной коры, – это только первое приближение к истине.

Во всех горных породах, кроме эвапоритов, содержания собственных минералов F определены микрообогатительными методами. Эти методы самые надежные, но несовершенные. Обычно учитывали только частицы акцессорных минералов крупностью 50–250 мкм или > 30–50 мкм. Таким образом, полученные цифры содержания собственных минералов F минимально возможные. Среднее содержание галита и сильвина в эвапоритах получено пересчетом химического состава этих образований на минеральный состав. Эти данные могут быть преувеличенными. Возможности сопоставления новых данных о роли собственных минералов как носителей масс F и Cl с результатами изучения конкретных проб континентальных пород ограничены. Корректны только данные, подтвержденные расчетами минеральных балансов галогенов. Такие данные есть только для F и Cl, но их мало и почти все они неполные – не учтен апатит. Полные минеральные балансы определены только в уральских гранитоидах: для F – 4, для Cl – 2 (Бушляков, 1989).

Установлено, что при валовом содержании F 0.05–0.12% в апатите сконцентрировано 2.9–7.2% его масс. Флюорит установлен в одной пробе (20% массы F). По данным неполных минеральных балансов в гранитах и гнейсах при увеличении валового содержания F > 0.2% доля его масс, сконцентрированная во флюорите, превышает 50%. Иногда в роли главного минерала F выступает F-биотит (содержание F 2–2.5%).

При валовом содержании Cl в гранитах и гнейсах 0.008–0.07 его собственные минералы не установлены.

Отмеченное не противоречит новым данным о средней роли собственных минералов F и Cl в качестве носителей этих элементов.

### 8.5. ВЫВОДЫ

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: F – 0.051; Cl – 0.15; Br – 0.0011; J –  $4.9 \cdot 10^{-5}$ . Среднее содержание в осадочных породах, %: F – 0.047; Cl – 0.65; Br – 0.0047; J –  $1.1 \cdot 10^{-4}$ . Больше половины масс F (60.05%) находится в метаморфических породах. Значительная часть масс остальных галогенов сконцентрирована в осадочных породах, %: Cl – 87.64, Br – 85.31, J – 44.8.

В верхней части континентальной коры в собственных минералах сконцентрировано 7.3% масс F, в том числе в апатите – 4.84, флюорите – 2.08, топазе – 0.18, гумите – 0.08, клиногумите – 0.07, бастнезите – 0.05%. В собственных минералах сконцентрировано 73.04% массы Cl, в том числе в галите 72.58, сильвине – 0.21, скаполите – 0.19, карналлите – 0.05, бишофите – 0.01, содалите – < 0.01%.

#### 9.1. МЕДЬ

##### 9.1.1. Среднее содержание и распределение масс Cu в верхней части континентальной коры

Приводимые в табл. 9.1 данные о среднем содержании Cu: в магматических породах гранитно-гнейсового слоя – по Л.Н. Овчинникову (1990), остальные – авторские (Григорьев, 2003). Средняя величина содержания Cu в верхней части континентальной коры (0.0039%) несколько больше величин 0.0014–0.0032%, публиковавшихся другими исследователями (Rudnick, Gao, 2004), но она меньше, чем 0.0053%, – кларкового для земной коры (Овчинников, 1990). Распределение Cu в верхней части континентальной коры соответствует требованиям геохимического баланса. Ее среднее содержание в осадочных породах (0.0031%) практически равно тому, которое должно быть в продуктах выветривания гранитно-гнейсового слоя современного состава (0.0033% по определению изоалюминиевым методом). Среднее содержание Cu максимально в основных породах, как магматических, так и ортометаморфических (табл. 9.1), но средние коэффициенты концентрации здесь всего 1.9–2.4. Главные носители Cu, парагнейсы и парасланцы (44.9% ее массы), характеризуются средним коэффициентом концентрации 1.3. В главных породах-концентраторах (основных вулканитах осадочного слоя, базитах и метабазитах гранитно-гнейсового слоя) сконцентрировано всего 14.6% массы Cu.

##### 9.1.2. Доли масс Cu, сконцентрированные в медных минералах

В начале XX в. предполагали, что Cu в земной коре в основном сконцентрирована в халькопирите (Санделл, Голдич, 1952). Б.И. Злобин (1969) показал, что в изверженных породах большая часть массы Cu находится в породообразующих минералах. Э.М. Спиридонов (1971), А.В. Рабинович, С.Г. Бадалов (1971) и ряд других исследователей определили минеральный баланс Cu в некоторых интрузивных породах, а автор – в метасоматитах и рудах железо-медно-скарновых месторождений Северного Урала. Анализ этих материалов показал, что главный медный минерал – халькопирит, в большинстве случаев – второстепенный носитель Cu. Роль его зависит от содержания Cu в горных породах (рудах) и минерального состава последних (Григорьев, 1999).

Таблица 9.1

**Среднее содержание и распределение масс Cu, Ag, Au (%) в ассоциации  
горных пород верхней части континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород  | Среднее содержание |                             |                               | Доли массы  |               |              |
|-------------------------------------------|--------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------|---------------|--------------|
|                                           |              | Cu                 | Ag,<br>н·10 <sup>-4</sup> % | Au,<br>н·1·10 <sup>-7</sup> % | Cu          | Ag            | Au           |
| Пески и песчаники                         | 5.11         | 0.0031             | 0.074                       | 3.1                           | 4.0         | 3.44          | 3.63         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4         | 0.0036             | 0.15                        | 4.6                           | 9.5         | 14.18         | 10.97        |
| Карбонатные породы                        | 3.85         | 0.0021             | 0.056                       | 2.2                           | 2.1         | 1.96          | 1.94         |
| Кремнистые породы                         | 0.33         | 0.0007             | 0.026                       | 2                             | 0.1         | 0.08          | 0.15         |
| Эвапориты                                 | 0.26         | Не опр.            | 0.08                        | Не опр.                       | Не опр.     | 0.19          | Не опр.      |
| Кислые вулканы                            | 0.44         | 0.0015             | 0.12                        | 3.9                           | 0.2         | 0.48          | 0.39         |
| Средние вулканы                           | 1.13         | 0.0044             | 0.16                        | 3                             | 1.3         | 1.64          | 0.78         |
| Основные вулканы                          | 2.11         | 0.0073             | 0.083                       | 3.9                           | 3.9         | 1.59          | 1.9          |
| Граниты                                   | 8.21         | 0.001              | 0.086                       | 2.7                           | 2.1         | 6.42          | 5.08         |
| Гранодиориты                              | 3.38         | 0.0029             | 0.14                        | 2.8                           | 2.5         | 4.3           | 2.17         |
| Базиты                                    | 1.5          | 0.0092             | 0.11                        | 3.5                           | 3.5         | 1.5           | 1.2          |
| Сиениты                                   | 0.05         | 0.0005             | 0.05                        | 2                             | < 0.1       | 0.02          | 0.02         |
| Ультрабазиты                              | 0.05         | 0.001              | 0.14                        | 6                             | < 0.1       | 0.06          | 0.07         |
| Метапесчаники                             | 2.92         | 0.0044             | 0.1                         | 6.6                           | 3.3         | 2.65          | 4.42         |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56        | 0.0052             | 0.14                        | 5                             | 40.4        | 38.89         | 35.05        |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13         | 0.0021             | 0.08                        | 5.3                           | 0.6         | 0.82          | 1.37         |
| Железистые породы                         | 0.38         | 0.0057             | 0.044                       | 8.9                           | 0.6         | 0.15          | 0.78         |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21        | 0.0029             | 0.081                       | 4.9                           | 17.2        | 17.09         | 26.08        |
| Метариолиты                               | 0.66         | 0.0028             | 0.11*                       | 2.6                           | 0.5         | 0.66*         | 0.39         |
| Метаандезиты                              | 1.03         | 0.0039             | 0.11*                       | 3.6                           | 1           | 1.03*         | 0.85         |
| Метабазиты                                | 3.29         | 0.0086             | 0.1                         | 3.4                           | 7.2         | 2.99          | 2.57         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>   | <b>0.0039</b>      | <b>0.11</b>                 | <b>4.36</b>                   | <b>100</b>  | <b>100.14</b> | <b>99.81</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95        | 0.00308            | 0.11                        | 3.65                          | 15.7        | 19.85         | 16.69        |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68         | 0.00571            | 0.11                        | 3.62                          | 5.4         | 3.71          | 3.07         |
| <b>Осадочный слой</b>                     | <b>23.63</b> | <b>0.0035</b>      | <b>0.11</b>                 | <b>3.64</b>                   | <b>21.1</b> | <b>23.56</b>  | <b>19.76</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19        | 0.00242            | 0.1                         | 2.83                          | 8.1         | 12.3          | 8.54         |
| Параметаморфиты                           | 34.99        | 0.00503            | 0.13                        | 5.19                          | 44.9        | 42.51         | 41.62        |
| Ортометаморфиты                           | 28.19        | 0.0036             | 0.085                       | 4.79                          | 25.9        | 21.77         | 29.89        |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой</b>            | <b>76.37</b> | <b>0.00405</b>     | <b>0.11</b>                 | <b>4.57</b>                   | <b>78.9</b> | <b>76.58</b>  | <b>80.05</b> |

\* Значения, принятые условно или вычисленные при недостаточном количестве исходных данных.



При массовых количественных минералогических анализах горных пород медные минералы учитывали относительно редко. Основные причины: малое их содержание и ограниченные возможности быстрой диагностики. В частности, из-за близости физических свойств халькопирита и пирита даже факт совместного наличия их не всегда может быть надежно установлен при просмотре тяжелых фракций проб под бинокулярным микроскопом без специальных мероприятий. Это особенно характерно для осадочных пород, где частицы сульфидов часто покрыты пленками других минералов. Тем не менее на основе количественных минералогических анализов было определено среднее содержание халькопирита в некоторых комплексах горных пород. Наиболее значительные и достоверные данные получены А.Б. Роновым с соавторами (1963) по пескам Русской платформы и В.В. Ляховичем (1967) по гранитам СССР. На основе этих и других подобных данных автор (Григорьев, 1999) определил приблизительно среднее содержание халькопирита в верхней части земной коры – 0.0011%. Это соответствует доле массы Cu (0.7%), сконцентрированной в халькопирите.

Здесь приведены результаты нового расчета роли медных минералов как носителей Cu в верхней части континентальной коры, ее слоях и в составляющих эти слои горных породах. Расчет выполнен на базе фрагмента модели химического строения земной коры А.Б. Ронина и др. (1990), несколько детализированного автором (Григорьев, 2003). Средние содержания медных минералов, кроме блеклых руд, рассчитаны по опубликованным в литературе результатам более чем 1750 количественных минералогических анализов проб горных пород, выполненных микрообогащительными методами. Большинство использованных данных выражено в цифрах, некоторые – как «сл.» или «р. зн.». Последние обозначения приравнены половине чувствительности использованных методов. Количество изученных проб: пески и песчаники > 990, сиениты – 210, граниты – 133, гранодиориты и прочие гранитоиды повышенной основности – 98, метабазиты – 74, базиты > 59, метапесчаники > 49, парагнейсы и парасланцы > 35. Количество проанализированных проб прочих горных пород или неизвестно, или меньше 30. Автору не удалось найти результаты количественных определений содержания медных минералов в глинах и глинистых сланцах, кремнистых породах, эвапоритах, метакarbonатных и железистых породах. Ниже перечислены главные источники данных.

*Пески и песчаники.* Глинисто-песчаные четвертичные отложения восточной части Балтийского щита (Ильин, Сыромятина, 1972); пески Русской платформы (Ронов и др., 1963); палеозойские терригенные породы Центрального Таджикистана (Бабкин, 1986); нижнерифейские песчаники и гравелиты Южного Урала (Сергеева, 1989).

*Глины и сланцы.* В описаниях глинистых сланцев изредка отмечают наличие медных минералов, но без указания их содержания. Здесь среднее содержание халькопирита в глинах и глинистых сланцах условно принято равным установленному для четвертичных отложений восточной части Балтийского щита (Ильин, Сыромятина, 1972).

*Карбонатные породы.* Известняки Русской платформы от меловых до докембрийских (Тимофеев, 1960).

*Вулканисты осадочного слоя.* Липариты Северного Кавказа (Ляхович, 1963); палеогеновые и меловые эффузивные породы Армении (Држбашян, 1965; Мнацаканян, 1965); пикритовые габбро-долериты и палагонитовые траппы Восточной Сибири (Альмухамедов, 1967; Наумов, Гурин, 1967).

*Гранитоиды.* Гранитоиды СССР (Ляхович, 1967); плагиограниты Армении (Бартикян, 1968); палеозойские гранитоиды Северного Тянь-Шаня (Туровский, Кокарев, 1968); диориты Приполярного Урала (Фишман и др., 1966) и Воронежского кристаллического массива (Чернышов, 1971).

*Базиты.* Уральские габбро, габбро-диабазы и прочие габброиды (Соболев, 1968; Фишман и др., 1968); лейкогаббро Казахстана (Спиридонов, 1971); докембрийские габброиды Воронежского кристаллического массива (Чернышов, 1971).

*Сиениты.* Палеозойские щелочные гранитоиды Северного Тянь-Шаня (Туровский, Кокарев, 1968); сиениты и щелочные габброиды Кольского полуострова (Батиева, Бельков, 1984, 1985); кембрийские сиениты Приполярного Урала (Фишман и др., 1968).

*Ультрабазиты.* Перидотиты Приполярного Урала (Фишман и др., 1968); докембрийские дуниты, перидотиты, серпентиниты Воронежского кристаллического массива (Чернышов, 1971).

*Метапесчаники.* Докембрийские метапесчаники, конгломераты, кварциты Приполярного Урала и Украинского щита (Фишман и др., 1966; Вигорова, Покровский, 1973; Носырев и др., 1986).

*Парагнейсы.* Докембрийские парасланцы Приполярного Урала (Вигорова, Покровский, 1973); метаосадочные сланцы предкарельского комплекса (кейвская и стрельнинская серии) Балтийского щита (Вулканизм..., 1987); докембрийские кристаллические сланцы Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Гранито-гнейсы.* Гнейсы гранулитовой фации Украинского щита (Носырев и др., 1986); уральские гранито-гнейсы (Ляхович, 1967).

*Метариолиты.* Уральские метадациты именновской свиты (Гурбанов и др., 1999); рифейские метаморфизованные кварцевые порфиры Приполярного Урала (Фишман и др., 1968); доордовикские кварцевые амфиболиты Приполярного Урала (Фишман и др., 1966).

*Метаандезиты.* Протерозойские содержащие кварц амфиболиты Северного Кавказа (Кременецкий, Овчинников, 1986); часть докембрийских амфиболитов Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Метабазиты.* Метабазальты из Уральской сверхглубокой скважины СГ-4 (Гурбанов и др., 1999); докембрийские зеленые сланцы и послеордовикские метаморфизованные диабазы и порфириты Приполярного Урала (Крылова и др., 1986; Фишман и др., 1966, 1968); докембрийские габбро-амфиболиты Центрального Памира (Акрамов, Дусматов, 1986); докембрийские метагабброиды и ортоамфиболиты Воронежского кристаллического массива (Чернышов, 1971). О расчете вероятного среднего содержания блеклых руд в этих объектах сказано в следующем разделе.

Согласно полученным данным, в верхней части континентальной коры в медных минералах сконцентрировано около 1.2% массы Cu, из них 0.98% в халькопирите (табл. 9.2). Последняя цифра несколько больше по-

Таблица 9.2

**Роль медных минералов как носителей Cu в верхней части континентальной коры**

| Минералы        | Содержание Cu в минералах, % | Осадочный слой       |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                   | Верхняя часть континентальной коры |                   |
|-----------------|------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|
|                 |                              | Содержание минералов | Доли масс Cu, % | Содержание минералов    | Доли масс Cu, %   | Содержание минералов               | Доли масс Cu, %   |
| Метаторбернит   | 7.6                          | Не опр.              | Не опр.         | $9.7 \cdot 10^{-9}$     | $2 \cdot 10^{-5}$ | $7.4 \cdot 10^{-9}$                | $1 \cdot 10^{-5}$ |
| Кубанит         | 23                           | $2.6 \cdot 10^{-5}$  | 0.171           | Не опр.                 | Не опр.           | $6 \cdot 10^{-6}$                  | 0.035             |
| Халькопирит     | 34.57                        | $1.6 \cdot 10^{-4}$  | 1.58            | $9.3 \cdot 10^{-5}$     | 0.784             | $1.1 \cdot 10^{-4}$                | 0.975             |
| Блеклые руды    | 38                           | $5.6 \cdot 10^{-8}$  | < 0.001         | $1.1 \cdot 10^{-7}$     | 0.001             | $9.6 \cdot 10^{-8}$                | 0.001             |
| Хризоколла      | 39                           | Не опр.              | Не опр.         | $3.5 \cdot 10^{-9}$     | $3 \cdot 10^{-5}$ | $2.7 \cdot 10^{-9}$                | $3 \cdot 10^{-5}$ |
| Азурит          | 55.3                         | $1 \cdot 10^{-5}$    | 0.158           | $1.6 \cdot 10^{-7}$     | 0.002             | $2.5 \cdot 10^{-6}$                | 0.035             |
| Малахит         | 57.4                         | $5.7 \cdot 10^{-6}$  | 0.093           | $8.6 \cdot 10^{-7}$     | 0.012             | $2 \cdot 10^{-6}$                  | 0.029             |
| Борнит          | 63.3                         | $8.9 \cdot 10^{-6}$  | 0.16            | $1.4 \cdot 10^{-7}$     | 0.002             | $2.2 \cdot 10^{-7}$                | 0.036             |
| Ковеллин        | 66.5                         | $5.6 \cdot 10^{-7}$  | 0.011           | $4.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.075             | $3.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.06              |
| Халькозин       | 79.8                         | $5.8 \cdot 10^{-7}$  | 0.013           | $5.5 \cdot 10^{-8}$     | 0.001             | $1.8 \cdot 10^{-7}$                | 0.004             |
| Медь самородная | 100                          | $1.2 \cdot 10^{-6}$  | 0.034           | $1.6 \cdot 10^{-7}$     | 0.004             | $4.1 \cdot 10^{-7}$                | 0.011             |
| Сумма           |                              |                      | 2.22            |                         | 0.881             |                                    | 1.186             |

Таблица 9.3

**Доли масс Cu (%), сконцентрированные в медных минералах в осадочных породах верхней части континентальной коры**

| Минералы        | Пески и песчаники             | Глины и сланцы            | Карбонатные породы        | Осадочные породы в целом    |
|-----------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Халькопирит     | $0.034 (3 \cdot 10^{-6})$     | $0.029 (3 \cdot 10^{-6})$ | $0.099 (6 \cdot 10^{-6})$ | $0.039 (3.5 \cdot 10^{-6})$ |
| Блеклые руды    | < 0.001 ( $2 \cdot 10^{-8}$ ) | $0.001 (1 \cdot 10^{-7})$ | Не опр.                   | $0.001 (5.7 \cdot 10^{-8})$ |
| Азурит          | $0.007 (4 \cdot 10^{-7})$     | Не опр.                   | Не опр.                   | $0.002 (1 \cdot 10^{-7})$   |
| Малахит         | $0.009 (5 \cdot 10^{-7})$     | Не опр.                   | Не опр.                   | $0.002 (1.3 \cdot 10^{-7})$ |
| Борнит          | $0.002 (1 \cdot 10^{-7})$     | Не опр.                   | Не опр.                   | $0.001 (2.6 \cdot 10^{-8})$ |
| Халькозин       | $0.003 (1 \cdot 10^{-7})$     | Не опр.                   | Не опр.                   | $0.001 (2.6 \cdot 10^{-7})$ |
| Медь самородная | $0.01 (1 \cdot 10^{-7})$      | Не опр.                   | Не опр.                   | $0.001 (3 \cdot 10^{-8})$   |
| Сумма           | 0.065                         | 0.03                      | 0.099                     | 0.047                       |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – среднее содержание минералов, %.

Таблица 9.4

**Доли масс Cu (%), сконцентрированные в медных минералах в вулканических породах осадочного слоя континентальной коры**

| Минералы        | Породы                      |                             |                                 |                               |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
|                 | Кислые                      | Средние                     | Основные                        | Вулканиды в целом             |
| Кубанит         | $0.015 (1 \cdot 10^{-6})$   | Не опр.                     | 0.95 (0.0003)                   | $0.67 (1.5 \cdot 10^{-4})$    |
| Халькопирит     | 6.91 (0.0003)               | 7.86 (0.001)                | 4.74 (0.001)                    | 6.07 (0.001)                  |
| Блеклые руды    | $0.001 (7.1 \cdot 10^{-8})$ | $0.001 (8.6 \cdot 10^{-8})$ | < 0.001 ( $2.6 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.001 ( $5 \cdot 10^{-8}$ ) |
| Азурит          | $0.73 (2 \cdot 10^{-5})$    | $0.25 (2 \cdot 10^{-5})$    | 0.76 (0.0001)                   | $0.68 (7 \cdot 10^{-5})$      |
| Малахит         | $0.077 (2 \cdot 10^{-6})$   | $0.26 (2 \cdot 10^{-5})$    | $0.39 (5 \cdot 10^{-5})$        | $0.37 (3.7 \cdot 10^{-5})$    |
| Борнит          | Не опр.                     | Не опр.                     | 0.87 (0.0001)                   | $0.63 (5.7 \cdot 10^{-5})$    |
| Ковеллин        | $1.33 (3 \cdot 10^{-5})$    | Не опр.                     | Не опр.                         | $0.04 (3.6 \cdot 10^{-6})$    |
| Халькозин       | $1.6 (3 \cdot 10^{-5})$     | Не опр.                     | Не опр.                         | $0.05 (3.6 \cdot 10^{-6})$    |
| Медь самородная | $0.13 (2 \cdot 10^{-6})$    | $0.18 (8 \cdot 10^{-6})$    | $0.11 (8 \cdot 10^{-6})$        | $0.13 (7.3 \cdot 10^{-6})$    |
| Сумма           | 10.793                      | 8.551                       | 7.82                            | 8.64                          |

Таблица 9.5

**Доли масс Cu (%), сконцентрированные в медных минералах  
в магматических породах гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы        | Граниты                          | Гранодиориты                     | Базиты                           | Сиениты                          | Ультраба-<br>зиты               | Магматические<br>породы в целом    |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Метаторбернит   | < 0.001<br>( $9 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                         | < 0.001<br>( $5.6 \cdot 10^{-8}$ ) |
| Халькопирит     | 4.15<br>( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )  | 0.954<br>( $8 \cdot 10^{-5}$ )   | 9.394<br>(0.0025)                | 1.87<br>( $2.7 \cdot 10^{-5}$ )  | 1.728<br>( $5 \cdot 10^{-5}$ )  | 5.47<br>( $3.8 \cdot 10^{-4}$ )    |
| Блеклые руды    | 0.002<br>( $4.5 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.001<br>( $6.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.001<br>( $3.5 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.                          | Не опр.                         | 0.001<br>( $5 \cdot 10^{-8}$ )     |
| Хризоколла      | 0.001<br>( $3 \cdot 10^{-8}$ )   | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                         | < 0.001<br>( $2 \cdot 10^{-8}$ )   |
| Азурит          | 0.072<br>( $1.3 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.008<br>( $4 \cdot 10^{-7}$ )   | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                         | 0.021<br>( $9 \cdot 10^{-7}$ )     |
| Малахит         | 0.115<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.01<br>( $5 \cdot 10^{-7}$ )    | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                         | 0.033<br>( $1.4 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Борнит          | 0.082<br>( $1.3 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                          | 0.063<br>( $1 \cdot 10^{-6}$ )  | 0.021<br>( $8 \cdot 10^{-7}$ )     |
| Ковеллин        | 0.047<br>( $7 \cdot 10^{-7}$ )   | 0.046<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                          | Не опр.                          | Не опр.                         | 0.026<br>( $9.5 \cdot 10^{-7}$ )   |
| Халькозин       | Не опр.<br>( $2 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.001<br>( $1 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.009                            | Не опр.<br>( $1 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.08<br>( $1.2 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.004                              |
| Медь самородная | 0.037<br>( $3.7 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.069<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                          | 0.2<br>( $1 \cdot 10^{-6}$ )     | 0.031                           | ( $7.5 \cdot 10^{-7}$ )            |
| Сумма           | 4.506                            | 1.089                            | 9.404                            | 2.07                             | 1.871                           | 5.607                              |

Таблица 9.6

**Доли масс Cu (%), сконцентрированные в медных минералах  
в параметаморфических породах**

| Минералы     | Метапесчаники               | Парасланцы                    | Параметаморфические<br>породы в целом |
|--------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Халькопирит  | 0.314 ( $4 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.073 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.09 ( $1.3 \cdot 10^{-5}$ )          |
| Блеклые руды | 0.001 ( $9 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.002 ( $2.2 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.002 ( $2 \cdot 10^{-7}$ )           |
| Малахит      | 0.13 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )  | Не опр.                       | 0.01 ( $8.4 \cdot 10^{-7}$ )          |
| Ковеллин     | 0.012 ( $8 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                       | < 0.001 ( $6.7 \cdot 10^{-8}$ )       |
| Сумма        | 0.457                       | 0.075                         | 0.102                                 |

лученной раньше для верхней части всей земной коры (0.7% масс Cu). Роль медных минералов в осадочном слое вдвое больше, чем в гранитно-гнейсовом, но в осадочных породах она минимальна (табл. 9.3). Максимальной ролью медных минералов характеризуются вулканиты осадочного слоя (табл. 9.4), причем доли масс Cu, сконцентрированные в медных минералах, последовательно уменьшаются от кислых вулканитов к основным. В гранитно-гнейсовом слое ситуация похожая: роль медных минералов максимальна в магматических породах, особенно в базитах (табл. 9.5), и минимальна в параметаморфических породах (табл. 9.6).

**Доли масс Cu (%), сконцентрированные в медных минералах  
в ортометаморфических породах**

| Минералы        | Гранито-гнейсы                | Метариолиты                     | Метаандезиты                | Метабазиты                  | Ортометаморфические породы в целом |
|-----------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Халькопирит     | 0.074 ( $6.2 \cdot 10^{-6}$ ) | 2.35 ( $1.9 \cdot 10^{-4}$ )    | 0.079 ( $9 \cdot 10^{-6}$ ) | 3.22 (0.0008)               | 0.547 ( $5.7 \cdot 10^{-5}$ )      |
| Блеклые руды    | < 0.001 ( $2 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.001 ( $3.2 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.                     | Не опр.                     | < 0.001 ( $2.1 \cdot 10^{-8}$ )    |
| Малахит         | 0.004 ( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.002 ( $1 \cdot 10^{-7}$ )     | Не опр.                     | 0.027 ( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.01 ( $6.3 \cdot 10^{-7}$ )       |
| Ковеллин        | Не опр.                       | 0.475 ( $2 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                     | 0.773 (0.0001)              | 0.222 ( $1.2 \cdot 10^{-5}$ )      |
| Халькозин       | Не опр.                       | Не опр.                         | Не опр.                     | 0.007 ( $8 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.002 ( $9.3 \cdot 10^{-8}$ )      |
| Медь самородная | 0.003 ( $1 \cdot 10^{-7}$ )   | Не опр.                         | Не опр.                     | Не опр.                     | 0.002 ( $8.2 \cdot 10^{-8}$ )      |
| Сумма           | 0.081                         | 2.827                           | 0.079                       | 4.027                       | 0.783                              |

Среди ортометаморфических пород максимальной ролью медных минералов характеризуются метариолиты (табл. 9.7). Везде халькопирит главный медный минерал.

### 9.1.3. Обсуждение полученных данных

Данные о вариациях содержаний Cu в горных породах многочисленны, поэтому полученные данные о средних содержаниях и распределении масс Cu в ассоциации горных пород, представляющих собой верхнюю часть континентальной коры, пока можно считать относительно корректными. Поскольку количество публикаций быстро увеличивается, желательны уточнение и детализация полученных данных. В частности, желательна оценка распределения масс Cu между участками горных пород, характеризующимися разным содержанием Cu.

Наименее изучен вопрос о роли медных минералов как носителей Cu. В верхней части континентальной коры только 66.9% масс Cu находится в горных породах, которые пока можно считать удовлетворительно изученными (> 35 определений содержания медных минералов в конкретной горной породе микрообогатительными методами). Микрообогатительные методы количественного минералогического анализа наиболее надежны, но тоже не лишены недостатков. При наиболее распространенных их вариантах учитывают только частицы медных минералов крупностью 50–250 или > 30–50 мкм. Таким образом, даже данные, характеризующие наиболее изученные горные породы, преуменьшены. Для осадочных и параметаморфических пород есть еще одна причина преуменьшения роли медных минералов – отсутствие достаточных данных о медистых песчаниках и сланцах. В работах, посвященных этим горным породам, в том числе и в обобщающих (Медный пояс..., 1963; Нарке-люн и др., 1983; Иванов, 1996, кн. 4), упомянуто много медных минералов, но данные об их содержании лишь качественные.

Возможности определения величины отмеченного преуменьшения пока практически нет. Для этого нужны данные о минеральных балансах Cu в континентальных породах (Григорьев, 1999а). Минеральные балансы Cu

определены только для некоторых магматических пород и тоже с учетом лишь относительно крупных частиц халькопирита, т. е. роль последнего в них также преуменьшена. В гранитах и аляскитах Средней Азии (Рабинович, Бадалов, 1971; Редкие элементы..., 1972) при валовом содержании  $\text{Cu}$  меньше среднего для гранитов (0.0003–0.0007%) медные минералы не установлены. При содержании  $\text{Cu}$ , близком к среднему (0.0007–0.0016%), в халькопирите сконцентрировано от 0 до 18% масс  $\text{Cu}$ . При содержании  $\text{Cu}$  больше среднего (0.0052%) в халькопирите сконцентрировано 53% ее масс. В гранодиоритах Средней Азии и Казахстана (Рабинович, Бадалов, 1971; Спиридонов, 1971) при содержании  $\text{Cu}$  меньше среднего (0.0006–0.0007%) доли ее масс, сконцентрированные в халькопирите, 1.0–2.9%. При содержании, близком к среднему (0.0012–0.005%), в халькопирите сконцентрировано от 1.0 до 29% масс  $\text{Cu}$ . Отмеченные данные в целом не противоречат нашим оценкам средних величин долей масс  $\text{Cu}$ , сконцентрированных в медных минералах гранитоидов. В лейкогаббро северо-восточного Казахстана при содержании  $\text{Cu}$ , близком к среднему (0.0042–0.0084%), доли масс  $\text{Cu}$ , сконцентрированные в халькопирите, варьируют от 26 до 54% (Спиридонов, 1971). Это существенно больше нашей оценки средней роли медных минералов в базитах гранитно-гнейсового слоя, но отмеченные лейкогаббро не относятся к наиболее распространенным базитам.

#### **9.1.4. Выводы**

Среднее содержание  $\text{Cu}$  в верхней части континентальной коры 0.0039%. Почти половина масс  $\text{Cu}$  (44.9%) сосредоточена в парагнейсах и парасланцах.

В верхней части континентальной коры в медных минералах сконцентрировано около 1.2% масс  $\text{Cu}$ , в том числе, %: в халькопирите – 0.975, ковеллине – 0.06, борните – 0.036, азурите – 0.035, кубаните – 0.035, малахите – 0.029, меди самородной – 0.011, халькозине – 0.004, блеклых рудах – 0.001. Максимальная концентрация  $\text{Cu}$  в медных минералах имеет место в вулканогенных породах осадочного слоя (8.64% массы) и магматических породах гранитно-гнейсового слоя (5.61% массы). Минимальной концентрацией  $\text{Cu}$  в медных минералах характеризуются осадочные (0.047% массы) и параметаморфические (0.1% массы) горные породы. Эти величины – очередное приближение к истине. Их нужно рассматривать как минимально возможные.

### **9.2. СЕРЕБРО**

#### **9.2.1. Среднее содержание и распределение массы $\text{Ag}$ в верхней части континентальной коры**

Расчет среднего содержания  $\text{Ag}$  в горных породах выполнен заново. Исходные данные – результаты анализов горных пород, опубликованные в литературе. Главные их источники: по осадочным породам (Гаврилов и др.,

2002; Гавшин и др., 1983; Моисеенко, 1977; Моисеенко и др., 1974; Остапенко, 2007; Федоров и др., 2005); вулканитам осадочного слоя (Герасимовский, Борисенко, 1977; Леонова, Кирсанов, 1974; Моисеенко и др., 1974; Нестеренко и др., 1969; Пчелинцева, 1978; Федчин и др., 1976; Хворостов, Зайцев, 1983); магматическим породам гранитно-гнейсового слоя (Захаров и др., 1977; Найбородин и др., 1981; Найбородин, Паланджян, 1981; Пчелинцева, 1978; Серебро..., 1989; Трошин и др., 1987; Fairbairn et al., 1953; Hamaguchi, Kuroda, 1959; Handbook..., 1974); метаморфическим породам (Воинов, Полеховский, 1985; Волкова и др., 1994; Говоров и др., 1982; Кременецкий и др., 1990; Кременецкий, Овчинников, 1986; Макрыгина и др., 1994; Boyle, 1968).

Среднее содержание Ag в некоторых горных породах уточнено существенно, но это мало повлияло на среднее содержание Ag в верхней части континентальной коры: прежняя цифра  $1.3 \cdot 10^{-5} \%$  (Григорьев, 2002), новая –  $1.1 \cdot 10^{-5} \%$ . Обе цифры существенно больше значений  $5 \cdot 10^{-6}$ – $5.5 \cdot 10^{-6} \%$ , приводившихся в литературе (Rudnick, Gao, 2004). Установлено, что состав горных пород мало влияет на распределение Ag (см. табл. 9.1). Средние коэффициенты концентрации Ag в отмеченных группах горных пород варьируют от 0.5 до 1.5. Максимальное среднее содержание Ag установлено в глинистых породах и продуктах их метаморфизма, в магматических породах среднего состава и, особенно, в андезитах. Высокое среднее содержание Ag установлено также в ультрабазитах, но это результат включения сюда метаультрабазитов. Почти 2/3 масс Ag (62.36%) находится в осадочных породах и продуктах их метаморфизма. Доля масс Ag, сосредоточенная в магматических породах (включая вулканиты осадочного слоя), 16.1%.

### **9.2.2. Вариации концентрации масс Ag в горных породах**

Основа расчета – частота встречаемости проб с разным содержанием Ag. Главные источники перечислены выше, но использованы в основном результаты анализов конкретных проб и средние по 2–9 пробам. Результаты обобщений более чем 10 анализов использованы в основном при наличии данных, позволяющих приблизительно определить количество проб с разным содержанием Ag. Результаты целенаправленных исследований участков с повышенным содержанием Ag не учитывались. Установлено, что участки с повышенным и высоким содержанием Ag ( $> 1.8 \cdot 10^{-5} \%$ ) представляют всего 5.76–23.17% масс изученных горных пород (табл. 9.8), но в таких участках сконцентрировано от 44.11 до 75.05% тех масс Ag, которые имеются в данных горных породах (табл. 9.9).

### **9.2.3. Роль максиминералов в минеральном балансе Ag**

Общепризнанное мнение о том, что в распространенных горных породах Ag полностью находится в породообразующих силикатах, кварце, сульфидах Fe, Cu, Pb и в магнетите, не доказано. Немногочисленные определения минеральных балансов Ag в магматических породах (Захаров и др.,

Таблица 9.8

**Соотношение масс горных пород с разным содержанием Ag, %**

| Горные породы                            | Количество проб | Содержание Ag, $\text{н} \cdot 10^{-4} \%$ |           |            |           |           |
|------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|
|                                          |                 | Низкое                                     | Среднее   | Повышенное |           | Высокое   |
|                                          |                 | < 0.06                                     | 0.06–0.18 | 0.18–0.54  | 0.54–1.62 | 1.62–4.86 |
| Пески и песчаники                        | 375             | 79.47                                      | 9.07      | 9.86       | 1.6       | 0         |
| Глины и глинистые сланцы                 | 328             | 53.66                                      | 23.17     | 17.98      | 4.88      | 0.31      |
| Кислые и средние вулканы                 | 1449            | 22.15                                      | 63.98     | 9.93       | 3.73      | 0.21      |
| Граниты, гранодириты, диориты            | 1241            | 45.3                                       | 39.16     | 14.18      | 0.96      | 0.4       |
| Базальты, диабазы, габброиды, метабазиты | 1660            | 47.53                                      | 42.12     | 9.63       | 0.54      | 0.18      |
| Метапесчаники                            | 156             | 56.42                                      | 37.82     | 3.2        | 1.92      | 0.64      |
| Парагнейсы и парасланцы                  | 660             | 48.7                                       | 39.36     | 10.29      | 0.9       | 0.75      |
| Гранито-гнейсы                           | 339             | 64.3                                       | 25.96     | 8.55       | 1.19      | 0         |

Таблица 9.9

**Распределение масс Ag, в горных породах с разным его содержанием, %**

| Горные породы                            | Количество проб | Содержание Ag, $\text{н} \cdot 10^{-4} \%$ |           |            |           |           |
|------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|
|                                          |                 | Низкое                                     | Среднее   | Повышенное |           | Высокое   |
|                                          |                 | < 0.06                                     | 0.06–0.18 | 0.18–0.54  | 0.54–1.62 | 1.62–4.86 |
| Пески и песчаники                        | 375             | 19.2                                       | 13.94     | 47.9       | 18.96     | 0         |
| Глины и глинистые сланцы                 | 328             | 7.02                                       | 17.93     | 40.77      | 29.12     | 5.16      |
| Кислые и средние вулканы                 | 1449            | 4.81                                       | 43.03     | 21.72      | 26.93     | 3.51      |
| Граниты, гранодириты, диориты            | 1241            | 13.4                                       | 33.7      | 35.42      | 8.83      | 8.65      |
| Базальты, диабазы, габброиды, метабазиты | 1660            | 13.12                                      | 46.81     | 27.35      | 7.23      | 5.49      |
| Метапесчаники                            | 156             | 22.06                                      | 29.69     | 13.57      | 18.92     | 15.76     |
| Парагнейсы и парасланцы                  | 660             | 14.35                                      | 23.63     | 21.93      | 6.87      | 33.22     |
| Гранито-гнейсы                           | 339             | 33.04                                      | 22.85     | 29.37      | 14.74     | 0         |

1977; Найбородин и др., 1981) некорректны. Валовое содержание Ag в пробах определено не анализом, а расчетом в предположении об истинности отмеченного мнения. Наиболее распространенные минералы-концентраторы Ag – сульфиды Fe, Cu, Pb, но содержание Ag больше 0.03%, минимальное для максиминералов (Григорьев, 1999), в них встречается относительно редко. Кроме серебряных минералов, максиминералами, как правило, являются золото самородное, медь самородная и блеклые руды, из которых наиболее распространены тетраэдрит и фрейбергит. Последний рассматрива-



ется нами как серебряный минерал. Содержание Ag, %: в золоте самородном (исключая кюстелит) – 0.09–20.0 при среднем – 12.0; в меди самородной – 0.1–4.0 (Handbook..., 1974), среднее, вероятно, около 0.3; в тетраэдрите – сл.–6.2%, среднее – 1.3, во фрейбергите – 12.74–26.4, среднее – 18.66.

Вычисления среднего содержания меди самородной и золота самородного в наиболее распространенных горных породах и верхней части континентальной коры охарактеризовано в соответствующих разделах данной главы. Ниже приведены результаты определения вероятного среднего содержания в горных породах серебряных минералов и тетраэдрита.

Вне серебряных месторождений в гранитоидах и габброидах установлены самородное серебро и блеклые руды (Ипатьева, 1968; Ляхович, 1967; Бартикян, 1968). Публикации не сопровождаются данными о валовом содержании Ag в исследованных пробах. Автором выполнены приблизительные расчеты по данным количественных минералогических анализов в предположении о максимально возможном содержании Ag в пороодообразующих минералах. Они показали, что валовое содержание Ag в исследованных пробах близко к среднему для данных горных пород. Примеры: биотитроговообманковый гранит горы Острой на Дальнем Востоке и гранитный пегматит Мурзинского массива на Урале (Ляхович, 1967). Содержание акцессорных минералов-концентраторов Ag ( $1 \cdot 10^{-4}$  %) в них соответственно: серебро самородное – 0.03 и 0.1, медь самородная – 0.03 и 0.0, галенит – 0.34 и 0.1, пирит – 7.69 и 1.6, магнетит – 1520 и 2. При расчете предполагалось, что содержание Ag в серебре самородном – 100, меди самородной – 4, галените – 0.02%. В прочих минералах приняты максимальные значения содержания Ag, установленные в минералах Магаданского батолита (Серебро..., 1989), %: магнетит –  $4.2 \cdot 10^{-5}$ , кварц –  $7 \cdot 10^{-6}$ , пирит – 0.0078, роговая обманка –  $1.2 \cdot 10^{-5}$ , биотит –  $6.3 \cdot 10^{-5}$ , плагиоклазы –  $5 \cdot 10^{-6}$ , калиевые полевые шпаты –  $1.76 \cdot 10^{-5}$ . Расчетные значения валового содержания Ag в пробах соответственно  $1.5 \cdot 10^{-5}$  и  $2.2 \cdot 10^{-5}$  %. В самородном серебре сконцентрировано соответственно 20 и 45% масс Ag. Однако в большинстве проб горных пород серебряные минералы не отмечены. Таким образом, пока есть основания предполагать, что в горных породах с содержанием Ag, близким к среднему, для них серебряные минералы встречаются редко. Косвенно это подтверждено результатами определений минеральных балансов Ag в метасоматитах Fe–Cu–скарновых месторождений Турьинской группы на Урале (табл. 9.10). Заметим, однако, что количественный минералогический анализ микрообогащительный. Им могли быть учтены только частицы минералов крупнее 30 мкм. Учет всех имеющихся материалов дает основания предполагать, что в распространенных горных породах с валовым содержанием Ag  $6 \cdot 10^{-6}$ – $1.8 \cdot 10^{-5}$  % средние величины долей масс Ag, сконцентрированные в серебряных минералах  $< 0.01$  %.

Сообщения о наличии серебряных минералов в рудах многочисленны, но лишь немногие содержат данные о валовом содержании Ag в исследованных пробах и образцах (Антонов, 1992; Геохимия серебра..., 1975; Константинов и др., 2003; Коробейников, 2006), и только некоторые материалы достаточны для приблизительного определения соотношений содержания Ag в пробах и долей его масс, сконцентрированных в максиминералах. В про-

Таблица 9.10

Минеральный баланс Ag в метасоматитах месторождений Турьинской группы на Урале

| Минералы    | В-8607 |      |     | В-8602 |         |         | Бш-8817 |         |         | Бш-8816 |         |         |
|-------------|--------|------|-----|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|             | 1      | 2    | 3   | 1      | 2       | 3       | 1       | 2       | 3       | 1       | 2       | 3       |
| Халькопирит | 0.46   | 53   | 41  | 0.37   | 97      | 28      | 0.13    | 730     | 68      | 0.92    | 54      | 33      |
| Пирит       | 0.44   | 10   | 7   | 1.1    | 54      | 46      | 0       | —       | —       | 0       | —       | —       |
| Кварц       | 0      | —    | —   | 7.4    | 0.2     | 1       | 0.3     | Не опр. | Не опр. | 1.4     | Не опр. | Не опр. |
| Магнетит    | 0.1    | 21   | 3   | 0.2    | Не опр. | Не опр. | 0       | —       | —       | 0       | —       | —       |
| Кальцит     | 1.5    | 0    | 0   | 16     | 0       | 0       | 13      | 0.1     | 1       | 6.2     | 0.45    | 2       |
| Андрадит    | 77     | 0.43 | 55  | 0      | —       | —       | 83      | 0.5     | 30      | 73      | 0.86    | 42      |
| Эпидот      | 0      | —    | —   | 62     | 0.21    | 10      | 0       | —       | —       | 0       | —       | —       |
| Пироксен    | 0      | —    | —   | 0      | —       | —       | 0.5     | Не опр. | Не опр. | 17      | 0.62    | 7       |
| Тремолит    | 7      | 0    | 0   | 0      | —       | —       | 0       | —       | —       | 0       | —       | —       |
| Хлорит      | 0      | —    | —   | 10     | 0       | 0       | 2.6     | 0       | 0       | 1.1     | 6       | 4       |
| Волластонит | 0      | —    | —   | 2.2    | Не опр. | Не опр. | 0       | —       | —       | 0       | —       | —       |
| В пробе     | 100    | 0.6  | 106 | 99.27  | 1.3     | 85      | 99.53   | 1.4     | 99      | 99.62   | 1.5     | 88      |

Примечание. В-8602 и В-8607 – эпидиот и гранатовый скори Южно-Песчанского Fe-скарного месторождения. Бш-8816, Бш-8817 – гранатовые скори Башмаковского Cu-скарного месторождения.

Здесь и в табл. 9.11: 1 – минеральный состав проб, %; 2 – содержание Ag в минералах и горных породах, n·10<sup>-4</sup> %; 3 – доли массы Ag и их сумма, %.

Таблица 9.11

Минеральный баланс Ag в рудах месторождений Центрального Казахстана. Приблизительный расчет по данным (Геохимия серебра..., 1975)

| Минералы                  | Джусайбай, Pb-Zn кварцево-жильное |        |      | Алайтыр, Pb гидротермальное |        |     | Асжал, Pb-Zn в известняках |         |        | Майкани, колчеданно-полиметаллическое |         |        | Торткудук, Au-Ag субвулканическое |         |      |
|---------------------------|-----------------------------------|--------|------|-----------------------------|--------|-----|----------------------------|---------|--------|---------------------------------------|---------|--------|-----------------------------------|---------|------|
|                           | 1                                 | 2      | 3    | 1                           | 2      | 3   | 1                          | 2       | 3      | 1                                     | 2       | 3      | 1                                 | 2       | 3    |
| Галенит                   | 2.71                              | 595*   | 42.4 | 24.4                        | 180*   | 84  | 4.25                       | 310*    | 18.9   | 1                                     | 153*    | 2.1    | 0.85                              | 80*     | 0.4  |
| Сфалерит                  | 0                                 | —      | —    | 0                           | —      | —   | 24.2                       | 91      | 31.6   | 6.9                                   | 76.8    | 7.4    | 1.28                              | 120     | 0.9  |
| Халькозин                 | 0                                 | —      | —    | 0                           | —      | —   | 0                          | —       | —      | 0.5                                   | 2700    | 18.8   | 0                                 | —       | —    |
| Борнит                    | 4.59                              | 216    | 26.1 | 1.07                        | 167    | 3.4 | 0                          | —       | —      | 1                                     | 1110    | 15.5   | 0                                 | —       | —    |
| Халькопирит               | 0.3                               | 230    | 1.8  | 0.13                        | 40     | 0.1 | 0                          | —       | —      | 1.7                                   | 113.6   | 2.6    | 0                                 | —       | —    |
| Блеклые руды              | 0.02                              | 29 300 | 15.4 | 0.0086                      | 30 200 | 5   | 0                          | —       | —      | 0.3                                   | 825     | 3.5    | 0                                 | —       | —    |
| Пирит                     | 7.97                              | 7.6    | 1.6  | 1.1                         | 123    | 2.6 | 2.7                        | 5.2     | 0.2    | 45                                    | 29.3    | 18.4   | 1.35                              | 50      | 0.4  |
| Породообразующие минералы | 84.41                             | 5.5    | 12.2 | 73.29                       | 3.5    | 4.9 | 68.85                      | 6.8     | 6.7    | 43.5                                  | 10      | 6.1    | 96                                | 4       | 2.2  |
| Серебряные минералы       | Не обн.                           | —      | —    | Не обн.                     | —      | —   | Есть                       | Не опр. | 42.6** | Есть                                  | Не опр. | 25.6** | Есть                              | Не опр. | 96** |
| В руде                    | 100                               | 38     | 95.5 | 99.9986                     | 52.2   | 100 | 100                        | 69.7    | 100    | 99.9                                  | 71.6    | 100    | 99.48                             | 170     | 100  |

\* Данные микроспектрального анализа; \*\* доли масс Ag, вероятно, сконцентрированные в серебряных минералах, качественно установленных в данных пробах.

бах из месторождений Центрального Казахстана (Геохимия серебра..., 1975), при валовом содержании Ag в рудах от 0.0038 до 0.017%, суммарные доли масс Ag, сконцентрированные в серебряных минералах и блеклых рудах (тетраэдрите?), варьируют от 5 до 96% (табл. 9.11). В «рудном горизонте» кварцевой жилы «Топиа» (Антонов, 1992) среднее содержание Ag 0.18%. Содержание Ag в минералах, %: сфалерит – 0.0083, галенит – 0.3, тетраэдрит-фрейбергит – 17, в полибазите оно, вероятно, соответствует среднему для этого минерала – 63.65. Распределение масс Ag, %: сфалерит – 0.9, галенит – 27, полибазит – 25, тетраэдрит-фрейбергит – 46. В промпродуктах переработки руд Джидинского W–Mo-месторождения, содержащих 0.036% Ag, цианированием извлекается 73% его массы (Коробейников, 2006). В 5 пробах полиметаллических руд месторождения Большой Канимансур (Таджикистан) с содержанием Ag 0.0027–0.017% в серебре самородном и акантите сконцентрировано в среднем 90 % масс Ag (Константинов и др., 2003). В сульфидной руде месторождения Высоковольное в Западном Узбекистане при валовом содержании Ag 0.0047% в серебряных минералах сконцентрировано не менее 65% его масс. Из руд Бугдаинского Mo–Au–Ag-месторождения, содержащих  $1.42 \cdot 10^{-4}$  % Ag, в концентраты извлекается 52.8% его масс (Коробейников, 2006), но какая часть этой доли сконцентрирована в имеющимся здесь золоте самородном, неясно. Обобщение всех доступных данных показало, что в рудах различного генезиса при валовом содержании Ag 0.017–0.18, 0.0066–0.0075 и 0.0038–0.0052% средние доли масс Ag, сконцентрированные в серебряных минералах, тетраэдрите, меди самородной и золоте самородном, соответственно равны 80, 44.2 и 35%. Интерполяция показала, что в горных породах с валовыми содержаниями Ag,  $n \cdot 10^{-4}$  % 0.54–1.62 и 1.62–4.86 средние суммарные доли масс Ag, сконцентрированные в отмеченных минералах, равны соответственно 5 и 12%. Исходя из этих и имеющихся в табл. 9.9 данных определены средние суммарные доли масс Ag, сконцентрированные в максиминералах в каждой из горных пород. Эти доли (за вычетом сконцентрированных в меди самородной и золоте самородном) пересчитаны на серебряные минералы и тетраэдрит. Соотношения содержаний этих минералов приняты соответственно частоте их упоминаний в литературе.

Согласно полученным данным, в верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 2.62% масс Ag, из них 2.58% – в серебряных минералах (табл. 9.12). В осадочном слое роль максиминералов меньше, чем в гранитно-гнейсовом. В осадочных и вулканогенных породах она соизмерима (табл. 9.13, 9.14), причем доли масс Ag, сконцентрированные в максиминералах, уменьшаются от глинистых пород к песчаным и от кислых вулканитов к основным. В магматических породах гранитно-гнейсового слоя (табл. 9.15) роль максиминералов как носителей Ag соизмерима с наблюдаемой в горных породах осадочного слоя, причем и здесь заметна тенденция уменьшения этой роли от кислых пород к основным. В верхней части континентальной коры максимальной ролью максиминералов характеризуются параметаморфические породы (табл. 9.16). Во всех горных породах среди максиминералов наиболее важную роль играют серебряные.

Таблица 9.12

**Предполагаемая роль серебряных максиминералов как носителей Ag  
в верхней части континентальной коры**

| Минералы    | Содержание Ag в минералах, мас. % | Осадочный слой                  |                 | Гранитно-гнейсовый слой         |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|             |                                   | Среднее содержание минералов, % | Доли масс Ag, % | Среднее содержание минералов, % | Доли масс Ag, % | Среднее содержание минералов, %    | Доли масс Ag, % |
| Медь        | 0.3                               | $1.2 \cdot 10^{-6}$             | 0.03            | $1.6 \cdot 10^{-7}$             | < 0.01          | $4.1 \cdot 10^{-7}$                | 0.01            |
| Тетраэдрит  | 1.3                               | $3.3 \cdot 10^{-8}$             | < 0.01          | $6.5 \cdot 10^{-8}$             | 0.01            | $5.7 \cdot 10^{-8}$                | 0.01            |
| Золото      | 12                                | $3.4 \cdot 10^{-8}$             | 0.04            | $1.3 \cdot 10^{-8}$             | 0.01            | $1.8 \cdot 10^{-8}$                | 0.02            |
| Фрейбергит  | 18                                | $2.3 \cdot 10^{-8}$             | 0.04            | $4.4 \cdot 10^{-8}$             | 0.08            | $3.9 \cdot 10^{-8}$                | 0.07            |
| Пираргирит  | 59                                | $4.5 \cdot 10^{-8}$             | 0.24            | $8.3 \cdot 10^{-8}$             | 0.45            | $7.4 \cdot 10^{-8}$                | 0.4             |
| Стефанит    | 68.2                              | $2 \cdot 10^{-8}$               | 0.12            | $4 \cdot 10^{-8}$               | 0.25            | $3.5 \cdot 10^{-8}$                | 0.22            |
| Хлораргирит | 70                                | $1.9 \cdot 10^{-8}$             | 0.12            | Не опр.                         | Не опр.         | $4.5 \cdot 10^{-9}$                | 0.03            |
| Акантит     | 86.5                              | $2.3 \cdot 10^{-8}$             | 0.18            | $4.4 \cdot 10^{-8}$             | 0.35            | $3.9 \cdot 10^{-8}$                | 0.31            |
| Аргентит    | 86.9                              | $4 \cdot 10^{-8}$               | 0.32            | $8.1 \cdot 10^{-8}$             | 0.64            | $7.1 \cdot 10^{-8}$                | 0.56            |
| Серебро     | 90.7                              | $6.8 \cdot 10^{-8}$             | 0.56            | $1.3 \cdot 10^{-7}$             | 1.07            | $1.2 \cdot 10^{-7}$                | 0.99            |
| Всего       |                                   |                                 | 1.65            |                                 | 2.86            |                                    | 2.62            |

Таблица 9.13

**Предполагаемая роль серебряных максиминералов как носителей Ag  
в осадочных породах**

| Минералы    | Пески и песчаники   |        | Глины и глинистые сланцы |         | Осадочные породы в целом |        |
|-------------|---------------------|--------|--------------------------|---------|--------------------------|--------|
|             | 1*                  | 2      | 1                        | 2       | 1                        | 2      |
| Медь        | $1 \cdot 10^{-7}$   | < 0.01 | Не опр.                  | Не опр. | $2.6 \cdot 10^{-8}$      | < 0.01 |
| Тетраэдрит  | $1.2 \cdot 10^{-8}$ | < 0.01 | $6 \cdot 10^{-8}$        | 0.01    | $3.4 \cdot 10^{-8}$      | < 0.01 |
| Золото      | $5.6 \cdot 10^{-8}$ | 0.09   | $4.6 \cdot 10^{-8}$      | 0.04    | $4 \cdot 10^{-8}$        | 0.04   |
| Фрейбергит  | $8 \cdot 10^{-9}$   | 0.02   | $4 \cdot 10^{-8}$        | 0.05    | $2.3 \cdot 10^{-8}$      | 0.04   |
| Пираргирит  | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.12   | $8 \cdot 10^{-8}$        | 0.31    | $4.6 \cdot 10^{-8}$      | 0.25   |
| Стефанит    | $7 \cdot 10^{-9}$   | 0.07   | $3.4 \cdot 10^{-8}$      | 0.15    | $2 \cdot 10^{-8}$        | 0.13   |
| Хлораргирит | $8 \cdot 10^{-9}$   | 0.08   | $4 \cdot 10^{-8}$        | 0.19    | $2.3 \cdot 10^{-8}$      | 0.15   |
| Акантит     | $8 \cdot 10^{-9}$   | 0.09   | $4 \cdot 10^{-8}$        | 0.23    | $2.3 \cdot 10^{-8}$      | 0.18   |
| Аргентит    | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.18   | $7 \cdot 10^{-8}$        | 0.41    | $4 \cdot 10^{-8}$        | 0.32   |
| Серебро     | $2.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.31   | $1.2 \cdot 10^{-7}$      | 0.73    | $6.9 \cdot 10^{-8}$      | 0.57   |
| Всего       |                     | 0.96   |                          | 2.11    |                          | 1.68   |

\* Здесь и в последующих таблицах: 1 – среднее содержание минералов, %; 2 – доли масс Ag (% от его общей массы в данной горной породе).

Таблица 9.14

**Предполагаемая роль серебряных максиминералов как носителей Ag  
в вулканитах осадочного слоя**

| Минералы   | Кислые              |        | Средние             |         | Основные            |         | В целом              |        |
|------------|---------------------|--------|---------------------|---------|---------------------|---------|----------------------|--------|
|            | 1                   | 2      | 1                   | 2       | 1                   | 2       | 1                    | 2      |
| Медь       | $2 \cdot 10^{-6}$   | 0.05   | $8 \cdot 10^{-6}$   | 0.15    | $8 \cdot 10^{-6}$   | 0.29    | $7.3 \cdot 10^{-6}$  | 0.2    |
| Тетраэдрит | $4.2 \cdot 10^{-8}$ | < 0.01 | $5.1 \cdot 10^{-8}$ | < 0.01  | $1.6 \cdot 10^{-8}$ | < 0.01  | $3 \cdot 10^{-8}$    | < 0.01 |
| Золото     | $1 \cdot 10^{-10}$  | < 0.01 | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | $1.2 \cdot 10^{-11}$ | < 0.01 |
| Фрейбергит | $2.9 \cdot 10^{-8}$ | 0.05   | $3.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.04    | $1 \cdot 10^{-8}$   | 0.02    | $2 \cdot 10^{-8}$    | 0.03   |
| Пираргирит | $5.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.28   | $7 \cdot 10^{-8}$   | 0.26    | $2.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.16    | $4.1 \cdot 10^{-8}$  | 0.22   |
| Стефанит   | $2.6 \cdot 10^{-8}$ | 0.15   | $3 \cdot 10^{-8}$   | 0.13    | $1 \cdot 10^{-8}$   | 0.08    | $1.8 \cdot 10^{-8}$  | 0.11   |
| Акантит    | $2.9 \cdot 10^{-8}$ | 0.21   | $3.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.19    | $1 \cdot 10^{-8}$   | 0.1     | $2 \cdot 10^{-8}$    | 0.16   |
| Аргентит   | $5.4 \cdot 10^{-8}$ | 0.39   | $6.6 \cdot 10^{-8}$ | 0.36    | $2 \cdot 10^{-8}$   | 0.21    | $3.8 \cdot 10^{-8}$  | 0.3    |
| Серебро    | $8.3 \cdot 10^{-8}$ | 0.63   | $1 \cdot 10^{-7}$   | 0.57    | $3.3 \cdot 10^{-8}$ | 0.36    | $6 \cdot 10^{-8}$    | 0.49   |
| Всего      |                     | 1.76   |                     | 1.7     |                     | 1.22    |                      | 1.51   |

Таблица 9.15

**Предполагаемая роль серебряных максиминералов как носителей Ag  
в магматических породах гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы   | Граниты             |        | Гранодиориты        |        | Базиты              |         | В целом             |        |
|------------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|---------|---------------------|--------|
|            | 1                   | 2      | 1                   | 2      | 1                   | 2       | 1                   | 2      |
| Медь       | $3.7 \cdot 10^{-7}$ | 0.01   | $2 \cdot 10^{-6}$   | 0.04   | Не опр.             | Не опр. | $7.5 \cdot 10^{-7}$ | 0.02   |
| Тетраэдрит | $2.6 \cdot 10^{-8}$ | < 0.01 | $4 \cdot 10^{-8}$   | < 0.01 | $2 \cdot 10^{-8}$   | < 0.01  | $2.9 \cdot 10^{-8}$ | < 0.01 |
| Золото     | $4.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.06   | $5.7 \cdot 10^{-8}$ | 0.05   | $7 \cdot 10^{-9}$   | 0.01    | $4.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.05   |
| Фрейбергит | $1.9 \cdot 10^{-8}$ | 0.04   | $2.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.04   | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.02    | $2.1 \cdot 10^{-8}$ | 0.04   |
| Пираргирит | $3.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.26   | $5.6 \cdot 10^{-8}$ | 0.24   | $3.1 \cdot 10^{-8}$ | 0.17    | $4.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.24   |
| Стефанит   | $1.6 \cdot 10^{-8}$ | 0.13   | $2.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.12   | $1.4 \cdot 10^{-8}$ | 0.09    | $1.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.12   |
| Акантит    | $1.9 \cdot 10^{-8}$ | 0.19   | $2.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.17   | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.12    | $2.1 \cdot 10^{-8}$ | 0.18   |
| Аргентит   | $3.4 \cdot 10^{-8}$ | 0.34   | $5.3 \cdot 10^{-8}$ | 0.33   | $3 \cdot 10^{-8}$   | 0.24    | $3.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.32   |
| Серебро    | $5.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.55   | $8.1 \cdot 10^{-8}$ | 0.53   | $4.4 \cdot 10^{-8}$ | 0.36    | $5.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.51   |
| Всего      |                     | 1.58   |                     | 1.52   |                     | 1.01    |                     | 1.48   |

Таблица 9.16

**Предполагаемая роль серебряных максиминералов как носителей Ag  
в метаморфических породах**

| Минералы   | Метапесчаники       |         | Парасланцы          |         | Гранито-гнейсы      |         | В целом             |        |
|------------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|--------|
|            | 1                   | 2       | 1                   | 2       | 1                   | 2       | 1                   | 2      |
| Медь       | Не опр.             | Не опр. | $5 \cdot 10^{-8}$   | 0.15    | $1 \cdot 10^{-7}$   | < 0.01  | $3.7 \cdot 10^{-8}$ | < 0.01 |
| Тетраэдрит | $5.3 \cdot 10^{-8}$ | 0.01    | $1.3 \cdot 10^{-7}$ | 0.01    | $1.2 \cdot 10^{-8}$ | < 0.01  | $7.2 \cdot 10^{-8}$ | 0.01   |
| Золото     | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | 0.19    | Не опр.             | Не опр. | Не опр.             | Не опр. | $7.2 \cdot 10^{-9}$ | 0.01   |
| Фрейбергит | $3.7 \cdot 10^{-8}$ | 0.07    | $9 \cdot 10^{-8}$   | 0.12    | $8.5 \cdot 10^{-9}$ | 0.02    | $4.9 \cdot 10^{-8}$ | 0.08   |
| Пираргирит | $7.4 \cdot 10^{-8}$ | 0.44    | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | 0.67    | $1.7 \cdot 10^{-8}$ | 0.12    | $9.1 \cdot 10^{-8}$ | 0.49   |
| Стефанит   | $3.3 \cdot 10^{-8}$ | 0.22    | $8 \cdot 10^{-8}$   | 0.39    | $7.5 \cdot 10^{-9}$ | 0.06    | $4.4 \cdot 10^{-8}$ | 0.27   |
| Акантит    | $3.7 \cdot 10^{-8}$ | 0.32    | $9 \cdot 10^{-8}$   | 0.56    | $8.5 \cdot 10^{-9}$ | 0.09    | $4.9 \cdot 10^{-8}$ | 0.38   |
| Аргентит   | $7 \cdot 10^{-8}$   | 0.61    | $1.7 \cdot 10^{-7}$ | 1.06    | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | 0.16    | $9 \cdot 10^{-8}$   | 0.71   |
| Серебро    | $1.1 \cdot 10^{-7}$ | 1       | $2.5 \cdot 10^{-7}$ | 1.62    | $2.4 \cdot 10^{-8}$ | 0.27    | $1.4 \cdot 10^{-7}$ | 1.15   |
| Всего      |                     | 2.86    |                     | 4.58    |                     | 0.73    |                     | 3.1    |

#### 9.2.4. Обсуждение полученных данных

Полученные данные – первое приближение к пониманию ситуации с Ag в верхней части континентальной коры. Данные о среднем содержании серебра в горных породах и распределении его масс в совокупности горных пород получены на основе относительно большого фактического материала. На этой стадии исследований эту часть данных можно считать достаточно корректной. Уточнение возможно после разработки более совершенной геохимической модели верхней части континентальной коры. Оно может быть доступно только исследователям, имеющим первичные результаты геохимического опробования значительных территорий. Данные, характеризующие роль максиминералов, и в том числе серебряных минералов как носителей Ag, нуждаются в уточнении. Но для этого необходимы специальные исследования.

#### 9.2.5. Выводы

Среднее содержание Ag в верхней части континентальной коры  $1.1 \cdot 10^{-5} \%$ . Участки с повышенным и высоким содержанием Ag ( $> 1.8 \cdot 10^{-5} \%$ ) представляют всего 5.76–23.17% масс изученных горных пород, но в таких участках сконцентрировано от 44.11 до 75.05% тех масс Ag, которые имеются в данных горных породах. В верхней части континентальной коры в максиминералах, вероятно, сконцентрировано 2.62% всей массы Ag, в том числе, %: в серебре самородном – 0.99, аргентите – 0.56, пираргирите – 0.4, акантите – 0.31, стефаните – 0.22, фрейбергите – 0.07, хлораргирите – 0.03, золоте самородном – 0.02, меди самородной – 0.01, тетраэдрите – 0.01.

### 9.3. ЗОЛОТО

#### 9.3.1. Среднее содержание и распределение масс Au в верхней части континентальной коры

Новые значения средних содержаний Au в горных породах, составляющих верхнюю часть континентальной коры (см. табл. 9.1), преимущественно несколько меньше приведенных раньше (Григорьев, 2002). Главные источники дополнительных данных, использованных при новом расчете (Гавриленко, 1982; Геохимия золота, 1978; Глухан, Серых, 2001; Кременецкий и др., 1990; Росляков, 1981; Ножкин, Гавриленко, 1976; Щербаков, 1967; Язева, Бочкарев, 1990; Ярошевич, 1983). Величина среднего содержания Au в верхней части континентальной коры, по новым данным ( $4.36 \cdot 10^{-7} \%$ ), существенно больше величин  $1.2 \cdot 10^{-7}$ – $1.85 \cdot 10^{-7} \%$ , приводившихся в литературе (Rudnick, Gao, 2004). Максимальным содержанием Au характеризуются параметаморфические породы. Распределение массы Au в совокупности горных пород почти пропорционально массам последних. Зависимость распределения масс Au в верхней части континентальной коры от химического и минерального состава горных пород минимальная. Средние коэффициенты концентрации

варьируют от 0.46 в кремнистых породах до 1.5 в железистых. Главные носители Au – метаморфические породы, в которых находится 71.51% масс Au. Распределение Au в верхней части континентальной коры близкое к требованиям геохимического баланса. Его среднее содержание в осадочных породах  $3.65 \cdot 10^{-7} \%$  практически равно тому, которое могло быть заимствовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава ( $3.72 \cdot 10^{-7} \%$  по определению изоалюминиевым методом).

### 9.3.2. Вариации концентрации масс Au в верхней части континентальной коры

Основа расчета – частота встречаемости проб с разным содержанием Au. Для ее определения использованы результаты систематического опробования отдельных территорий. Результаты изучения золоторудных месторождений и связанных с ними полей литогеохимических ореолов не учтены (исключены выборки со средним содержанием Au  $> 1 \cdot 10^{-6} \%$ ). Главные источники данных (Гавриленко, 1982; Докембрий..., 1976; Коробейников, 1985; Коробейников и др., 1983; Коробейников, Гончаренко, 1986; Моисеенко и др., 1971, 1974; Росляков, 1981; Щербаков, 1967; Язева, Бочкарев, 1990; Ярошевич, 1983; Handbook..., 1974). Установлено, что 97.4% масс верхней части континентальной коры представлено горными породами с содержанием Au, близким к кларковому (табл. 9.17). В них находится 73.5% масс Au. Содержанием Au  $1 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-5} \%$ , соответствующим литогеохимическим ореолам, характеризуется почти 2.6 % масс континентальных пород. Здесь сконцентрировано 23.4 % масс Au, КК – 2.3–115. Экстраполяция показала, что содержанием Au  $5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-3} \%$ , соответствующим промышленным и потенциально промышленным рудам, характеризуется около 0.01% масс континентальных пород. Здесь сконцентрировано 3.1% масс Au, КК – от 115 до  $> 11\,500$ .

Таблица 9.17

#### Распределение масс Au по фрагментам верхней части континентальной коры, характеризующимся разным содержанием Au

| Содержание Au во фрагментах, %          |                      | Количество проб | Доли масс фрагментов, % | Доли масс Au, % | Коэффициенты концентрации Au |
|-----------------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------|
| Интервалы                               | Среднее              |                 |                         |                 |                              |
| $< 1 \cdot 10^{-8}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ | $3.29 \cdot 10^{-7}$ | 6840            | 97.4                    | 73.5            | $< 0.2$ –2.3                 |
| $1 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-6}$   | $2.5 \cdot 10^{-6}$  | 150             | 2.14                    | 12.3            | 2.3–11                       |
| $5 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-5}$   | $7.5 \cdot 10^{-6}$  | 25              | 0.36                    | 6.2             | 11–23                        |
| $1 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-5}$   | $2.5 \cdot 10^{-5}$  | 6               | 0.085                   | 4.9             | 23–115                       |
| $5 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$   | $7.5 \cdot 10^{-5}$  | Экстраполяция   | 0.01                    | 1.7             | 115–229                      |
| $1 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-4}$   | $2.5 \cdot 10^{-4}$  | —               | 0.0012                  | 0.7             | 229–1147                     |
| $5 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$   | $7.5 \cdot 10^{-4}$  | —               | 0.0003                  | 0.5             | 1147–2294                    |
| $1 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-3}$   | $2.5 \cdot 10^{-3}$  | —               | $4 \cdot 10^{-5}$       | 0.2             | 2294–11 468                  |
| В верхней части континентальной коры    | $4.36 \cdot 10^{-7}$ | 7021            | 99.99654                | 100.0           | 1                            |

### 9.3.3. Минеральный баланс золота в горных породах и рудах

Большинство данных о распределении масс Au по минералам горных пород некорректно. Наиболее распространенный недостаток – отсутствие прямых определений валового содержания Au в исследованных породах. По корректным сведениям (Бушляков, 1971; Григорьев, 1999; Мушкин и др., 1974; Коробейников и др., 1983; Сазонов, 1989, 1991; Спиридонов, 1971) при валовых содержаниях Au, близких к кларковым, главные его носители – порообразующие минералы. Наиболее важные концентраторы: сульфиды (КК – 2–400), гетит (КК – 1.4–10), часто – магнетит (КК – 0.5–8), реже – другие акцессорные минералы. Роль этих минералов-концентраторов как носителей Au в распространенных горных породах незначительна (сульфиды – 0–8%, магнетит – 0–8% масс Au), но она увеличивается в метасоматитах и рудах с повышенным содержанием Au (Григорьев, 1999). Самородное золото учтено только в минеральных балансах Au в корах выветривания метасоматитов Светлинского месторождения (Григорьев, 1999). Здесь его роль зависит от валового содержания Au (табл. 9.18). Есть мнение, что в порообразующих и акцессорных минералах Au представлено преимущественно микрочастицами самородного золота и других золотых минералов (Иванов, 1996, кн. 4). Оно основано на результатах изучения минералов из золотых руд и горных пород с неизвестным (вероятно, высоким) содержанием Au (Давлетов и др., 1973). В сульфидах и некоторых других минералах нередко находят микрочастицы самородного золота, вместе с тем экспериментально установленный предел содержания Au, распределенного в пирите равномерно, –  $3 \cdot 10^{-4} \%$  (Таусон и др., 2001), что в 1000 раз больше обычного содержания Au в большинстве минералов. По данным рентгеноспектрального и лазерного микроанализов, максимальные содержания «невидимого золота» в сульфидах уральских колчеданных месторождений, г/т: сфалерит – 0.12, халькопирит – 0.09, борнит – 0.07, пирит – 0.022 (Викентьев и др., 2004). По результатам рациональных анализов, в уральских колчеданных рудах распределение масс Au следующее, %: все формы самородного золота – 12.6–90, «сульфидное золото» – 10–87.4, химически связанное с силикатами и кварцем – 0–8.4 (Молошаг, Викентьев, 2003). В богатых медных и существенно пиритовых рудах наблюдается тенденция прямой зависимости роли самородного золота от его валовых

Таблица 9.18

**Прямая зависимость роли самородного золота (> 20 мкм) от содержания Au в коре выветривания метасоматитов Светлинского месторождения на Урале (Григорьев, 1999). Анализы микрообогатительные**

| №№ проб | Содержание Au, $10^{-4} \%$ | Доли самородного золота в массе Au, % |
|---------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 158     | 1.35                        | 24                                    |
| 3       | 0.33                        | Не обн.                               |
| 169     | 0.11                        | 20                                    |
| 178     | 0.018                       | 3                                     |
| 214     | 0.0042                      | 8                                     |



**Прямая зависимость роли самородного золота от содержания Au в рудах уральских колчеданных месторождений. Расчет по данным (Молошаг, Викентьев, 2003). Анализы рациональные**

| Разновидности руд                               | №№ проб           | Валовое содержание Au, 10 <sup>-4</sup> % | Доли самородного золота в массе Au, % |
|-------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| Богатые медные (борнит + халькопирит > 25%)     | 502/74            | 21.2                                      | 90                                    |
|                                                 | 059               | 8.36                                      | 69.9                                  |
|                                                 | 536/78            | 7.9                                       | 75.9                                  |
|                                                 | K15/82            | 3.4                                       | 53                                    |
|                                                 | 0103              | 2.56                                      | 51.2                                  |
|                                                 | 057               | 2.54                                      | 64.6                                  |
|                                                 | 501/74            | 2.5                                       | 44                                    |
|                                                 | 507/77            | 2.16                                      | 50.9                                  |
| Существенно пиритовые руды (пирит 66.5–72%)     | K14/82            | 1.36                                      | 31.6                                  |
|                                                 | 0102              | 5.4                                       | 51.9                                  |
|                                                 | K16/82            | 4.4                                       | 34.1                                  |
|                                                 | C2064/94.4–100.6  | 1.83                                      | 12.6                                  |
|                                                 | C-2               | 1.52                                      | 13.1                                  |
|                                                 | C-1               | 1.01                                      | 20.6                                  |
|                                                 | C2064/37.9–39.3   | 0.93                                      | 14                                    |
|                                                 | C2066/123.6–125.3 | 0.19                                      | 15.8                                  |
| Кварцево-пиритовые (кварц 29–51%, пирит 36–59%) | C1/34             | 0.31                                      | 35.4                                  |
|                                                 | C2/7              | 0.29                                      | 41.4                                  |

содержаний (табл. 9.19). Экстраполяция показывает, что в сульфидах при содержании Au < 5·10<sup>-6</sup> % роль микрочастиц золотых минералов незначительна. Вероятно, такая же ситуация и с большинством других минералов. Возможно, роль самородного золота повышена в кварце. Об этом свидетельствуют результаты изучения кварцево-пиритовых руд (см. табл. 9.19), но руды эти изучены недостаточно.

#### 9.3.4. О среднем содержании самородного золота в горных породах

Литературных данных недостаточно для расчета обычными способами средних содержаний самородного золота в большинстве горных пород. Сообщений о наличии самородного золота в горных породах много, но обычно нет данных о содержании этого минерала и валовом содержании Au. Автору известно три случая обнаружения самородного золота в горных породах с содержанием Au, близким к кларковому (Богдецкий, 1989; Григорьев, 1999; Никулова и др., 2003). Больше данных о содержаниях самородного золота в горных породах с повышенным валовым содержанием Au и в золотых рудах. Они использованы при расчете. При этом учтена вероятная распространенность минеральных веществ с соответствующим содержанием Au (см. табл. 9.17). Ниже даны главные источники данных.

*Пески и песчаники.* Самородное золото характерно для участков песков, песчаников и более грубообломочных осадочных пород с валовым содер-

Таблица 9.20

**Прямая зависимость роли самородного золота от валового содержания Au  
в песчаных золотоносных отложениях и их суглинистой части (класс < 10 мкм).  
Расчет по данным (Брик и др., 1969). Анализы рациональные**

| Район        | Песчаные отложения                   |                                          | Класс < 10 мкм                       |                                          |
|--------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|
|              | Содержание Au,<br>10 <sup>-4</sup> % | Доли самородного<br>золота в массе Au, % | Содержание Au,<br>10 <sup>-4</sup> % | Доли самородного<br>золота в массе Au, % |
| Забайкалье   | 6.29                                 | 95                                       | 7.96                                 | 95                                       |
| Средний Урал | 4.65                                 | 71                                       | 4.84                                 | 67                                       |
| Забайкалье   | 2.89                                 | 92                                       | 0.6                                  | Не обн.                                  |
| Якутия       | 2.78                                 | 86                                       | 0.52                                 | 24                                       |
| Сибирь       | 1.94                                 | 74                                       | Не обн.                              | Не обн.                                  |
| Южный Урал   | 0.54                                 | 11                                       | 0.46                                 | 35                                       |

жанием Au > 1·10<sup>-5</sup> %. Такие участки обширны (Константиновский, 2005; Резник, Федорчук, 2000; Чен-Лен-Сон, 1999). К.А. Брик с коллегами (Брик и др., 1989) подробно изучили шесть проб золотоносных песков из пяти районов СССР (табл. 9.20). Пробы объемом 0.125–1.0 м<sup>3</sup> были разделены на классы крупности. Анализ классов рациональный, методика традиционная, но с заменой цианирования тиомочевинным выщелачиванием. Установлена прямая зависимость роли самородного золота от валового содержания Au. При расчете среднего содержания предполагалось, что роль самородного золота в песках и песчаниках одинаковая.

*Глины и глинистые сланцы.* Известно о наличии в глинистых породах значительных масс самородного золота, не только мелкого, но и относительно крупного – «гравитационного». В некоторых глинистых толщах выделены шлиховым опробованием обширные ореолы «барьерного типа» (Таусон и др., 1969), но опубликованные данные неконкретны. При расчете среднего содержания самородного золота использованы результаты изучения существенно глинистых классов (< 10 мкм) проб из россыпей (см. табл. 9.20) и пробы № 158 существенно глинистой коры выветривания золотоносных метасоматитов (см. табл. 9.18).

*Карбонатные породы.* В.Д. Тимофеев (1960) изучил известняки (от докембрийских до меловых) из 15 карьеров, расположенных на Русской платформе. Карбонаты были растворены. Самородное золото в виде листочков (30–40 мкм) установлено в нерастворимых остатках проб из трех карьеров, в двух карьерах – единичные знаки. В известняках одного карьера среднее содержание самородного золота 1·10<sup>-5</sup> %. Валовое содержание Au в последних не известно. При расчете предполагалось, что оно > 1·10<sup>-5</sup> %.

*Вулканиды осадочного слоя.* Самородное золото установлено в риолитах Приполярного Урала (Никулова и др., 2003) и кислых вулканидах Армении, измененных гидротермальными процессами (Држбашян, 1965). Наиболее вероятное его среднее содержание здесь 1·10<sup>-8</sup> %. В вулканидах других районов этот минерал не отмечали. При расчете предполагалось, что наличием самородного золота характеризуется 1% всей массы кислых вулканидов.

*Граниты.* По В.В. Ляховичу (Ляхович, 1967), среднее содержание самородного золота в уральских гранитах 5·10<sup>-8</sup> % (оно установлено в двух про-

**Вариации долей масс Au, сконцентрированных в самородном золоте.  
Интрузивные породы Сонкульского комплекса, Тянь-Шань.  
По данным микрообогатительных анализов (Богдецкий, 1989)**

| Габброиды |                            |                                 | Гранодиориты, сиенито-диорит, граносиенит |                            |                                 | Граниты, аплиты, гранит-порфиры |                            |                                 |
|-----------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| №№ проб   | Содержание Au, $10^{-4}$ % | Доли масс самородного золота, % | №№ проб                                   | Содержание Au, $10^{-4}$ % | Доли масс самородного золота, % | №№ проб                         | Содержание Au, $10^{-4}$ % | Доли масс самородного золота, % |
| 3024      | 0.016                      | 1.3                             | 3174                                      | 0.08                       | 62                              | 3175                            | 0.07                       | 86                              |
| 3022      | 0.014                      | 4.2                             | 3067                                      | 0.067                      | 60                              | 3027                            | 0.07                       | 0.6                             |
| 3013      | 0.012                      | 2.9                             | 3141                                      | 0.065                      | 46                              | 3090                            | 0.052                      | 0.2                             |
|           |                            |                                 | 3079                                      | 0.024                      | 83                              | 3124                            | 0.029                      | 14                              |
|           |                            |                                 |                                           |                            |                                 | 3139/4                          | 0.020                      | 30                              |
|           |                            |                                 |                                           |                            |                                 | 3169                            | 0.01                       | 100                             |
|           |                            |                                 |                                           |                            |                                 | 3115                            | 0.01                       | 50                              |
|           |                            |                                 |                                           |                            |                                 | 3061                            | 0.0088                     | 2                               |

Примечание. В таблице не учтены 6 проб, где содержание Au, по данным химико-активационных анализов, оказалось меньше содержания самородного золота, определенного микрообогатительным способом.

бах из 65). По В.Н. Богдецкому (Богдецкий, 1989), в гранитпорфирах, миа-ролитовых гранитах и аплитах Сонкульского комплекса (Тянь-Шань) содержание самородного золота варьирует от  $1 \cdot 10^{-8}$  до  $5 \cdot 10^{-6}$  % (9 проб) при валовом содержании Au  $8.8 \cdot 10^{-7}$ – $7 \cdot 10^{-6}$  % (табл. 9.21). Среднее содержание самородного золота в лейкократовых гранитах и аплитах Яно-Колымской системы  $3.7 \cdot 10^{-6}$  % (Ипатьева, 1976).

*Гранодиориты (включая близкие к ним гранитоиды).* В гранодиоритах и близких к ним гранитоидах Сонкульского комплекса содержание самородного золота  $2 \cdot 10^{-6}$ – $4 \cdot 10^{-6}$  % (4 пробы), валовое содержание Au здесь  $2.4 \cdot 10^{-6}$ – $8 \cdot 10^{-6}$  % (Богдецкий, 1989). В меловых и третичных плагиогранитах и кварцевых плагиопорфирах Армении (Бартикян, 1968) среднее содержание самородного золота  $< 1 \cdot 10^{-7}$  % (29 проб).

*Базиты.* В габбро-норитах и габбро-диоритах Воронежского кристаллического массива (Чернышов, Плаксенко, 1982) среднее содержание самородного золота  $4 \cdot 10^{-6}$  % (19 проб), валовое содержание Au неизвестно. В габброидах Сонкульского комплекса на Тянь-Шане (Богдецкий, 1989) содержание самородного золота  $2 \cdot 10^{-8}$ – $6 \cdot 10^{-8}$  %, валовое содержание Au –  $1.2 \cdot 10^{-6}$ – $1.6 \cdot 10^{-6}$  % (3 пробы).

*Ультрабазиты.* В дунитах, пироксенитах, перидотитах Воронежского кристаллического массива (Чернышов, Плаксенко, 1982) среднее содержание самородного золота  $8.8 \cdot 10^{-7}$  % (70 проб). В большинстве других массивов этот минерал не отмечали. При расчете предполагалось, что наличием самородного золота характеризуется 1% всей массы ультрабазитов.

*Метапесчаники и метаконгломераты.* Методами, позволявшими установить наличие самородного золота, изучено 44 пробы метапесчаников СССР. Самородное золото установлено в пробе из Тувы, его содержание  $1.1 \cdot 10^{-5}$  % (Ляхович, 1966). Изучено 40 проб ордовикских метаконгломератов Приполярного Урала с валовым содержанием Au  $2 \cdot 10^{-7}$ – $4 \cdot 10^{-5}$  % (Нику-

лова и др., 2003; Севастьянов, 1972). В нескольких пробах обнаружены единичные частицы самородного золота. М.И. Ипатов и Т.И. Степанова (Ипатов, Степанова, 1966) не обнаружили самородное золото в 60 пробах метаконгломератов Восточного Саяна, но сообщили о содержании этого минерала  $4 \cdot 10^{-5} \%$  в одной из 10 проб, изученных сотрудниками ВИМСа. А.А. Степанов (1966) изучил 161 пробу метаконгломератов Патомского нагорья. Мелкие частицы самородного золота установлены в трех пробах. По значительному количеству изученных проб рассчитано среднее арифметическое содержание самородного золота  $1.6 \cdot 10^{-7} \%$ .

*Остальные горные породы.* Методами, позволявшими установить наличие самородного золота, изучено более 380 проб. Этот минерал не обнаружен.

### 9.3.5. Роль самородного золота как носителя Au в горных породах и верхней части континентальной коры

При расчете предполагалось, что среднее содержание элементов-примесей в самородном золоте мало. Расчет показал, что роль самородного золота максимальная в метапесчаниках и метаконгломератах, затем следуют гранодиориты (включая близкие к ним гранитоиды), граниты, пески и глинистые породы (табл. 9.22). Согласно этим данным, в верхней части континентальной коры

Таблица 9.22

**Роль самородного золота как носителя Au в горных породах и верхней части континентальной коры**

| Горные породы                                 | Среднее содержание, $1 \cdot 10^{-7} \%$ |                    | Доли масс самородного золота, %* |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|
|                                               | Au                                       | самородного золота |                                  |
| Пески и песчаники                             | 3.1                                      | 0.56               | 18                               |
| Глины и глинистые сланцы                      | 4.6                                      | 0.46               | 10                               |
| Карбонатные породы                            | 2.2                                      | 0.1                | 4.5                              |
| Осадочные породы в целом                      | 3.65                                     | 0.4                | 13                               |
| Кислые вулканы                                | 3.9                                      | 0.001              | $3 \cdot 10^{-4}$                |
| Вулканы в целом                               | 3.62                                     | 0.0001             | $3 \cdot 10^{-5}$                |
| Граниты                                       | 2.7                                      | 0.42               | 16                               |
| Гранодиориты                                  | 2.8                                      | 0.57               | 20                               |
| Базиты                                        | 3.5                                      | 0.07               | 2                                |
| Ультрабазиты                                  | 6                                        | 0.01               | 0.2                              |
| Магматические породы гранитно-гнейсового слоя | 2.83                                     | 0.42               | 15                               |
| Метапесчаники и метаконгломераты              | 6.6                                      | 1.6                | 24                               |
| Параметаморфиты в целом                       | 5.19                                     | 0.13               | 2.5                              |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b>     | <b>4.36</b>                              | <b>0.18</b>        | <b>4.1</b>                       |
| Осадочный слой                                | 3.64                                     | 0.34               | 9.3                              |
| Гранитно-гнейсовый слой                       | 4.57                                     | 0.13               | 2.8                              |

\* Доли масс самородного золота даны в % от масс Au в данном объекте: горной породе, слое или в верхней части континентальной коры.

Таблица 9.23

Доли масс Au, сконцентрированные в самородном золоте, во фрагментах верхней части континентальной коры, характеризующихся разным содержанием Au. Расчет преимущественно по данным (Богдецкий, 1989; Брик и др., 1989; Бушляков, 1971; Григорьев, 1999; Молошаг, Викентьев, 2003; Сазонов, 1991)

| Интервалы содержания Au во фрагментах, % | Распределение масс Au по фрагментам, % | Характеристика исходных данных                                                   |                                    |                 |                      | Доли масс Au, сконцентрированные в самородном золоте, % |                                        |  |
|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|--|
|                                          |                                        | Вещества, представляющие фрагменты                                               | Методы анализов                    | Количество проб | Вариации в веществах | Средние во фрагментах*                                  | В верхней части континентальной коры** |  |
| $< 1 \cdot 10^{-8}$ – $1 \cdot 10^{-6}$  | 73.5                                   | Граниты, метасоматиты и кора выветривания метасоматитов                          | Микрообогатительные                | 12              | 0–8                  | 0.9 (0.9)                                               | 0.7                                    |  |
| $1 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-6}$    | 12.3                                   | Габброиды, гранитоиды, метасоматиты                                              | –”–                                | 14              | 0–83                 | 13 (6)                                                  | 0.7                                    |  |
| $5 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-5}$    | 6.2                                    | Гранитоиды                                                                       | –”–                                | 6               | 0.2–86               | 42 (12)                                                 | 0.7                                    |  |
| $1 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-5}$    | 4.9                                    | Суглинок, руды сульфидные и кварцево-сульфидные, кора выветривания метасоматитов | Рациональные и микрообогатительные | 7               | 0–55                 | 29 (21)                                                 | 1                                      |  |
| $5 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$    | 1.7                                    | Песок, суглинок, сульфидные руды                                                 | Рациональные                       | 4               | 0–23                 | 12 (31)                                                 | 0.5                                    |  |
| $1 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-4}$    | 0.7                                    | Пески, суглинки, сульфидные руды, кора выветривания метасоматитов                | Рациональные, микрообогатительный  | 16              | 13–92                | 49 (51)                                                 | 0.4                                    |  |
| $5 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$    | 0.5                                    | Песок, суглинок, сульфидные руды                                                 | Рациональные                       | 5               | 32–95                | 77 (77)                                                 | 0.4                                    |  |
| $1 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-3}$    | 0.2                                    | Сульфидная руда                                                                  | Рациональный                       | 1               | 90                   | 90 (90)                                                 | 0.2                                    |  |
| Суммы                                    | 100.0                                  |                                                                                  |                                    | 65              |                      |                                                         | 4.6                                    |  |

\* В скобках даны величины, скорректированные интерполяцией и принятые при расчете долей масс Au, сконцентрированных в самородном золоте в верхней части континентальной коры; \*\* % всей массы Au, имеющейся в верхней части континентальной коры.

континентальной коры в самородном золоте сконцентрировано 4.1% масс Au. В расчете не учтено большинство метаморфических пород. Причина – отсутствие данных о содержании в них самородного золота, но не исключено, что оно существенно, поэтому полученную цифру следует рассматривать как минимально возможную.

Возможен другой вариант расчета, основанный на соотношении валовых содержаний Au и самородного золота в наиболее изученных пробах горных пород и руд (табл. 9.23). Роль минералов-концентраторов как носителей химических элементов в горных породах и рудах зависит от многих факторов (Григорьев, 1999). Для большинства элементов (включая Au) главных факторов три: валовое содержание элемента, минеральный состав и генезис горной породы (руды). Роль валового содержания увеличивается с уменьшением кларкового содержания элемента. У Au оно очень низкое и это дает возможность на данной стадии исследований пренебрегать разницей минерального состава и генезиса учитываемых горных пород и руд. Главные источники данных (Богдецкий, 1989; Брик и др., 1989; Бушляков, 1971; Григорьев, 1999; Молошаг, Викентьев, 2003; Сазонов, 1991). Сведения об отсутствии самородного золота учтены, если подтверждены расчетами минеральных балансов Au и если содержание Au во всех минералах данной горной породы  $< 5 \cdot 10^{-6} \%$ . Не учтены 6 проб гранитоидов, где содержание самородного золота по минералогическому анализу больше валового содержания Au по химико-активационному анализу (Богдецкий, 1989). По этому варианту расчета в самородном золоте сконцентрировано 4.6% массы Au, имеющейся в верхней части континентальной коры.

### 9.3.6. Выводы

Среднее содержание Au в верхней части континентальной коры  $4.36 \cdot 10^{-7} \%$ , зависимость распределения масс Au от химического и минерального состава горных пород минимальная. Главные носители Au метаморфические породы, в которых находится 71.51% его масс. Установлено, что 97.4% массы верхней части континентальной коры представлено горными породами с содержанием Au, близким к кларковому, в которых сконцентрировано 73.5% Au. Почти 2.6% масс континентальных пород имеет содержание Au  $1 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-5} \%$ , соответствующее положительным литогеохимическим ореолам, в них содержится 23.4% масс Au. Коэффициенты концентрации 2.3–115. Содержанием Au  $5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3} \%$ , соответствующим промышленным и потенциально промышленным рудам, характеризуется около 0.01% всей массы верхней части континентальной коры. Здесь сконцентрировано 3.1% масс Au. Коэффициенты концентрации от 115 до  $> 11\,500$ . В самородном золоте сконцентрировано 4.1–4.6% масс Au, имеющейся в верхней части континентальной коры.

#### 10.1. СРЕДНЕЕ СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС Zn, Cd и Hg В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

В геохимическом и минералого-геохимическом отношении Zn, Cd и Hg изучены недостаточно. Вариации содержания Cd определены преимущественно в молодых осадочных породах, меньше данных о древних осадочных и магматических. По метаморфическим породам данных почти нет, недостаточно их и о вариациях содержаний двух других элементов. Большинство средних содержаний Zn, Cd и Hg в горных породах включая опубликованные автором (Григорьев, 2003б) были рассчитаны при недостатке исходных данных. Исправленные данные приведены в табл. 10.1. Главные источники, использованные дополнительно (Аникиев и др., 2004; Гелетий и др., 2005; Глухан, Серых, 1999–2001; Ефимов, Потапова, 2002; Зорина и др., 2000; Иванов и др., 2006; Карнаухова, 1999; Кашин, 1999; Кременецкий и др., 1990; Кузнецов и др., 2006; Маслов и др., 2006; Поляков, 2003; Поляков, Боцул, 2004; Di Leo et al., 2002; Huber et al., 2001). Исправленные величины средних содержаний в верхней части континентальной коры, %: Zn –  $0.0075$  и Cd –  $6.4 \cdot 10^{-5}$  несколько больше величин (Zn  $0.0052$ – $0.0071$ , Cd  $7.5 \cdot 10^{-6}$ – $1.02 \cdot 10^{-5}$ ), публиковавшихся другими исследователями (Rudnick, Gao, 2004). Приводимое здесь среднее содержание Hg в верхней части континентальной коры  $6.5 \cdot 10^{-6}$  % находится в пределах величин, приводившихся в литературе, –  $1.23 \cdot 10^{-6}$ – $9.6 \cdot 10^{-6}$ .

Зависимость распределения масс Zn и Hg в верхней части континентальной коры от химического и минерального состава горных пород минимальная. Средние коэффициенты концентрации (за вычетом наиболее сомнительных цифр) Zn  $0.28$ – $1.5$ , Hg  $0.31$ – $1.4$ . Массы Zn и Hg распределены в верхней части континентальной коры почти пропорционально массам горных пород, главные их носители метаморфические породы, в которых находится  $68.38\%$  масс Zn и  $67.54\%$  масс Hg. Среднее содержание Zn и Hg в осадочных породах континентальной коры  $0.0069$  и  $5.7 \cdot 10^{-6}$  %, близкое к тому, которое могло быть унаследовано от гранитно-гнейсового слоя современного состава ( $0.0065$  и  $5.8 \cdot 10^{-6}$  %). Корректность данных по Cd пока недостаточна для подобных определений, но ситуация с ним, вероятно, близкая.

Таблица 10.1

**Распределение масс Zn, Cd, Hg в ассоциации горных пород  
верхней части континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород, % | Среднее содержание, 10 <sup>-4</sup> % |              |              | Доли масс, % |                |               |
|-------------------------------------------|----------------|----------------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|
|                                           |                | Zn                                     | Cd           | Hg           | Zn           | Cd             | Hg            |
| Пески и песчаники                         | 5.11           | 67                                     | 0.74         | 0.049        | 4.57         | 5.91           | 3.85          |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4           | 89                                     | 0.91         | 0.068        | 12.34        | 14.79          | 10.88         |
| Карбонатные породы                        | 3.85           | 26                                     | 0.58         | 0.038        | 1.33         | 3.49           | 2.25          |
| Кремнистые породы                         | 0.33           | 21                                     | 0.39         | 0.068        | 0.09         | 0.2            | 0.34          |
| Эвапориты                                 | 0.26           | Не опр.                                | Не опр.      | 0.033        | Не опр.      | Не опр.        | 0.13          |
| Кислые вулканиты                          | 0.44           | 35                                     | 0.2          | 0.058        | 0.21         | 0.14           | 0.39          |
| Средние вулканиты                         | 1.13           | 31                                     | 0.2          | 0.049        | 0.47         | 0.35           | 0.85          |
| Основные вулканиты                        | 2.11           | 114                                    | 0.4          | 0.061        | 3.21         | 1.32           | 1.98          |
| Граниты                                   | 8.21           | 39                                     | 0.41         | 0.06         | 4.27         | 5.26           | 7.58          |
| Гранодиориты                              | 3.38           | 53                                     | 0.44         | 0.052        | 2.39         | 2.32           | 2.70          |
| Базиты                                    | 1.5            | 110                                    | 0.4*         | 0.07         | 2.2          | 0.94           | 1.62          |
| Сиениты                                   | 0.05           | 130                                    | 0.13*        | 0.026        | 0.09         | 0.01*          | 0.02          |
| Ультрабазиты                              | 0.05           | 46                                     | 0.05*        | 0.02         | 0.03         | 0.04*          | 0.02          |
| Метапесчаники                             | 2.92           | 65                                     | 0.7*         | 0.08         | 2.53         | 3.19*          | 3.59          |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56          | 94                                     | 0.9*         | 0.085        | 38.3         | 42.98*         | 39.96         |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13           | 59                                     | 0.6*         | 0.031        | 0.89         | 1.06*          | 0.54          |
| Железистые породы                         | 0.38           | 130                                    | Не опр.      | 0.045        | 0.66         | Не опр.        | 0.26          |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21          | 63                                     | 4.4*         | 0.058        | 19.5         | 15.96*         | 20.71         |
| Метариолиты                               | 0.66           | 35*                                    | 0.3*         | Не опр.      | 0.31         | 0.31*          | Не опр.       |
| Метаандезиты                              | 1.03           | 100                                    | 0.3*         | Не опр.      | 1.37         | 0.48*          | Не опр.       |
| Метабазиты                                | 3.29           | 110                                    | 0.4*         | 0.049        | 4.82         | 2.06           | 2.48          |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>     | <b>75</b>                              | <b>0.64*</b> | <b>0.065</b> | <b>99.58</b> | <b>100.81*</b> | <b>100.15</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95          | 69                                     | 0.78         | 0.057        | 18.33        | 24.39          | 17.45         |
| Вулканиты осадочного слоя                 | 3.68           | 79                                     | 0.31         | 0.057        | 3.89         | 1.81           | 3.22          |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b>23.63</b>   | <b>71</b>                              | <b>0.71</b>  | <b>0.057</b> | <b>22.22</b> | <b>26.2</b>    | <b>20.67</b>  |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19          | 51                                     | 0.41         | 0.059        | 8.98         | 8.57           | 11.94         |
| Параметаморфиты                           | 34.99          | 91                                     | 0.86*        | 0.082        | 42.38        | 47.23*         | 44.35         |
| Ортометаморфиты                           | 28.19          | 69                                     | 0.43*        | 0.053        | 26           | 18.81          | 23.19         |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой в целом</b>    | <b>76.37</b>   | <b>76</b>                              | <b>0.62*</b> | <b>0.068</b> | <b>77.36</b> | <b>74.61*</b>  | <b>79.48</b>  |

\* Величины, вычисленные при недостаточном количестве исходных данных или предполагаемые.



## 10.2. О СРЕДНЕМ СОДЕРЖАНИИ МАКСИМИНЕРАЛОВ И ИХ РОЛИ КАК НОСИТЕЛЕЙ Zn, Cd и Hg

Данных о содержании Zn, Cd и Hg в минералах относительно много. Коэффициенты их концентрации в кварце и полевых шпатах обычно  $< 1$ , а в темноцветных цепочечных и листовых силикатах  $> 1$ . Главными минералами-концентраторами Zn, Cd и Hg, кроме их собственных минералов, являются преимущественно сульфиды, но в чужих минералах содержания Zn, Cd и Hg больше минимальных для максиминералов (Zn 0.7, Cd 0.04 и Hg 0.03%) относительно редки. Исключения – сфалерит в отношении Cd, а также блеклые руды и реальгар в отношении Hg. Опубликованные представления о роли конкретных минералов в качестве носителей Zn, Cd и Hg в горных породах и рудах, как правило, не сопровождаются необходимыми доказательствами, но в литературе имеются результаты количественных и полуколичественных определений содержания аксессуарных минералов в тысячах проб горных пород. В некоторых случаях учтены сфалерит, реальгар, метациннабарит, что дало возможность приблизительного определения средних содержаний этих максиминералов (кроме тетраэдрита и фрейбергита) в горных породах верхней части континентальной коры и ее слоях. Исходные данные приведены в разделе 9.1.2. Ниже отмечены только наиболее важные объекты.

*Вулканиды осадочного слоя.* Липариты Тырны-Ауза (Северный Кавказ) (Ляхович, 1963; Ляхович, Чирвинская, 1961); липариты, андезиты, а также порфиры (липарит-дацитовые, андезитовые, базальтовые, диабазовые, долеритовые) Армении (Мнацаканян, 1965; Джрбачан, 1965); вулканиды северо-востока Сибири (Ипатьева, Соловьев, 1982). Почти во всех отмеченных случаях нет данных о валовом содержании Zn, Cd и Hg в исследованных пробах. Часть исследованных вулканогенных пород характеризуется полиметаллической специализацией. Результаты минералогических анализов последних учтены с коэффициентом 0.05.

*Гранодиориты.* Гранодиориты Тянь-Шаня (Коконбаев, Туровский, 1989); гранитоиды повышенной основности Кольского полуострова (Бельков, 1979) и Дальнего Востока (Ипатьева, 1976, Недашковский, 1982).

*Базиты.* Габброиды Воронежского кристаллического массива (Чернышов, 1971; Чернышов, Плаксенко, 1982) и Дальнего Востока (Недашковский, 1982).

*Ультрабазиты.* Дуниты, пироксениты, перидотиты, серпентиниты Воронежского массива (Чернышов, 1971; Чернышов, Плаксенко, 1982).

*Парасланцы и гранито-гнейсы Тянь-Шаня* (Коконбаев, Туровский, 1989). Отметим, что в литературе содержание киновари в изученных пробах горных пород, как правило, обозначено как «сл.» или «р. зн.». Эти величины приравнивались к половине чувствительности методов анализа, примененных авторами публикаций. Тетраэдрит и фрейбергит при количественных минералогических анализах горных пород не учитывали или учитывали совместно. Их среднее содержание определено при изучении закономерностей распределения Ag в горных породах включая литогеохимические ореолы (см. раздел 9.2).

Таблица 10.2

**Доли масс Zn и Cd, сконцентрированные в сфалерите в горных породах, слоях и в верхней части континентальной коры**

| Горные породы                                     | Средние содержания сфалерита, %       | Доли масс, % |             |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-------------|
|                                                   |                                       | Zn           | Cd          |
| Пески и песчаники                                 | $1 \cdot 10^{-5}$                     | 0.07         | 0.06        |
| Осадочные породы в целом                          | $2.6 \cdot 10^{-6}$                   | 0.02         | 0.02        |
| Кислые вулканиды                                  | $6 \cdot 10^{-5}$                     | 0.85         | 1.32        |
| Средние вулканиды                                 | $6 \cdot 10^{-5}$                     | 0.96         | 1.32        |
| Основные вулканиды                                | $1.5 \cdot 10^{-4}$                   | 0.65         | 1.65        |
| Вулканиды в целом                                 | $1.1 \cdot 10^{-4}$                   | 0.69         | 1.56        |
| <b>Осадочный слой</b>                             | <b><math>1.9 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b>0.14</b>  | <b>0.12</b> |
| Граниты                                           | $3.5 \cdot 10^{-5}$                   | 0.45         | 0.38        |
| Гранодиориты                                      | $2 \cdot 10^{-4}$                     | 1.88         | 2           |
| Базиты                                            | $1.8 \cdot 10^{-5}$                   | 0.08         | 0.2         |
| Сиениты                                           | $3 \cdot 10^{-6}$                     | 0.01         | 0.1         |
| Ультрабазиты                                      | $6 \cdot 10^{-6}$                     | 0.07         | 0.53        |
| <b>Магматиты гранитно-гнейсового слоя в целом</b> | <b><math>7.5 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b>0.73</b>  | <b>0.81</b> |
| Метапесчаники                                     | $1.3 \cdot 10^{-4}$                   | 0.99         | 0.82        |
| Парагнейсы и парасланцы                           | $7 \cdot 10^{-5}$                     | 0.37         | 0.34        |
| <b>Параметаморфические породы в целом</b>         | <b><math>7.2 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b>0.39</b>  | <b>0.37</b> |
| Гранито-гнейсы                                    | $3 \cdot 10^{-5}$                     | 0.24         | 0.3         |
| Метариолиты                                       | $2 \cdot 10^{-5}$                     | 0.28         | 0.29        |
| Метаандезиты                                      | $1 \cdot 10^{-8}$                     | < 0.01       | < 0.01      |
| Метабазиты                                        | $2.2 \cdot 10^{-6}$                   | 0.01         | 0.02        |
| <b>Ортометаморфические породы в целом</b>         | <b><math>2.5 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b>0.18</b>  | <b>0.26</b> |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой</b>                    | <b><math>5.5 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b>0.36</b>  | <b>0.39</b> |
| Верхняя часть континентальной коры                | $4.6 \cdot 10^{-5}$                   | 0.31         | 0.32        |

Примечание. Принятое при расчетах среднее содержание в сфалерите: Zn 49.7, Cd 0.44%.

Таблица 10.3

**Роль киновари и других максиминералов как носителей Hg в верхней части континентальной коры**

| Минералы       | Содержание Hg в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|----------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|                |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Hg, % | Содержание минералов, % | Доли масс Hg, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Hg, % |
| Реальгар       | 0.16                         | $1.2 \cdot 10^{-7}$     | 0.003           | $4.8 \cdot 10^{-10}$    | < 0.001         | $2.8 \cdot 10^{-8}$                | 0.001           |
| Тетраэдрит     | 0.22                         | $3.3 \cdot 10^{-8}$     | 0.001           | $6.5 \cdot 10^{-8}$     | 0.002           | $5.7 \cdot 10^{-8}$                | 0.002           |
| Фрейбергит     | 0.22                         | $2.3 \cdot 10^{-8}$     | 0.001           | $4.4 \cdot 10^{-8}$     | 0.001           | $3.9 \cdot 10^{-8}$                | 0.001           |
| Метациннабарит | 82                           | Не опр.                 | Не опр.         | $1 \cdot 10^{-9}$       | 0.012           | $7.6 \cdot 10^{-10}$               | 0.01            |
| Киноварь       | 83.4                         | $9 \cdot 10^{-8}$       | 1.317           | $5 \cdot 10^{-8}$       | 0.613           | $5.9 \cdot 10^{-8}$                | 0.757           |
| Сумма          |                              |                         | 1.322           |                         | 0.628           |                                    | 0.771           |

**Доли масс Hg, сконцентрированные в киновари и других максиминералах  
(% от общей ее массы в данной горной породе)**

| Горные породы                             | Среднее содержание минералов, %       |                                       |                                       | Доли масс Hg в минералах, % |              |                |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------|----------------|
|                                           | Киноварь                              | Блеклые руды                          | Прочие                                | Киноварь                    | Блеклые руды | Прочие         |
| Пески и песчаники                         | Не опр.                               | $2 \cdot 10^{-8}$                     | Не опр.                               | Не опр.                     | 0.001        | Не опр.        |
| Глины и глинистые сланцы                  | Не опр.                               | $1 \cdot 10^{-7}$                     | Не опр.                               | Не опр.                     | 0.003        | Не опр.        |
| Карбонатные                               | $1.6 \cdot 10^{-7}$                   | Не опр.                               | Не опр.                               | 3.512                       | Не опр.      | Не опр.        |
| <b>Осадочные в целом</b>                  | <b><math>3 \cdot 10^{-8}</math></b>   | <b><math>5.7 \cdot 10^{-8}</math></b> | <b>Не опр.</b>                        | <b>0.439</b>                | <b>0.002</b> | <b>Не опр.</b> |
| Кислые вулканыты                          | $1 \cdot 10^{-6}$                     | $7.1 \cdot 10^{-8}$                   | $1.5 \cdot 10^{-5}$                   | 14.38                       | 0.003        | 0.414          |
| Средние вулканыты                         | $1 \cdot 10^{-6}$                     | $8.6 \cdot 10^{-8}$                   | $1 \cdot 10^{-5}$                     | 17.02                       | 0.004        | 0.327          |
| Основные вулканыты                        | Не опр.                               | $2.6 \cdot 10^{-8}$                   | $5 \cdot 10^{-6}$                     | Н.опр.                      | 0.001        | 0.131          |
| <b>Вулканыты осадочного слоя</b>          | <b><math>4.3 \cdot 10^{-7}</math></b> | <b><math>5 \cdot 10^{-8}</math></b>   | <b><math>7.7 \cdot 10^{-6}</math></b> | <b>6.292</b>                | <b>0.002</b> | <b>0.216</b>   |
| Граниты                                   | $4 \cdot 10^{-8}$                     | $4.5 \cdot 10^{-8}$                   | $1.45 \cdot 10^{-8}$                  | 0.556                       | 0.002        | 0.137          |
| Гранодиориты                              | $3 \cdot 10^{-7}$                     | $6.8 \cdot 10^{-8}$                   | Не опр.                               | 4.812                       | 0.003        | Не опр.        |
| Базиты                                    | $1 \cdot 10^{-7}$                     | $3.5 \cdot 10^{-8}$                   | Не опр.                               | 1.191                       | 0.001        | Не опр.        |
| Ультрабазиты                              | $1 \cdot 10^{-7}$                     | Не опр.                               | Не опр.                               | 4.17                        | Не опр.      | Не опр.        |
| <b>Магматиты гранитно-гнейсового слоя</b> | <b><math>1.1 \cdot 10^{-7}</math></b> | <b><math>5 \cdot 10^{-8}</math></b>   | <b><math>3.4 \cdot 10^{-9}</math></b> | <b>1.555</b>                | <b>0.002</b> | <b>0.083</b>   |
| Метапесчаники                             | Не опр.                               | $9 \cdot 10^{-8}$                     | Не опр.                               | Не опр.                     | 0.003        | Не опр.        |
| Парагнейсы и парасланцы                   | Не опр.                               | $2.2 \cdot 10^{-7}$                   | Не опр.                               | Не опр.                     | 0.005        | Не опр.        |
| <b>Параметаморфиты в целом</b>            | <b>Не опр.</b>                        | <b><math>2 \cdot 10^{-7}</math></b>   | <b>Не опр.</b>                        | <b>Не опр.</b>              | <b>0.005</b> | <b>Не опр.</b> |
| Гранито-гнейсы                            | $1 \cdot 10^{-7}$                     | $2 \cdot 10^{-8}$                     | Не опр.                               | 1.44                        | 0.001        | Не опр.        |
| Метабазиты                                | Не опр.                               | $3.2 \cdot 10^{-8}$                   | Не опр.                               | Не опр.                     | 0.001        | Не опр.        |
| <b>Оргоматоморфиты в целом</b>            | <b><math>8.3 \cdot 10^{-8}</math></b> | <b><math>2.1 \cdot 10^{-8}</math></b> | <b>Не опр.</b>                        | <b>1.31</b>                 | <b>0.001</b> | <b>Не опр.</b> |

Примечание. Прочие минералы: в вулканиках – реальгар, в гранитах – реальгар ( $4.5 \cdot 10^{-9} \%$ ) и метациннабарит ( $1 \cdot 10^{-8} \%$ ), в магматитах гранитно-гнейсового слоя – реальгар ( $2.8 \cdot 10^{-9} \%$ ) и метациннабарит ( $6 \cdot 10^{-9} \%$ ).

Согласно полученным данным, роль сфалерита как носителя Zn и Cd наиболее значительна в гранодиоритах, вулканиках и метаморфических породах, а минимальная – в осадочных породах (табл. 10.2). Главный максиминерал Hg киноварь (табл. 10.3). Роль ее максимальна в вулканиках. Роль метациннабарита, блеклых руд и аурипигмента заметна только в вулканиках и гранитах (табл. 10.4).

### 10.3. О МИНЕРАЛЬНОМ БАЛАНСЕ Zn, Cd и Hg В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

**Цинк.** До 1994 г. при расчете минеральных балансов Zn в горных породах цинковые минералы не учитывали. Полученные результаты делятся на две группы. Первая характеризует гранитоиды (Воронов, Селиванова,

1971; Таусон, 1961), серпентинит, метадиабаз и метасоматиты березит-лиственитовой формации (Сазонов, 1986) с валовым содержанием Zn 0.003–0.01%. Установлено, что Zn почти равномерно распределен в породообразующих минералах. Иногда наблюдали слабую концентрацию его в темноцветных минералах, особенно в биотите. Вторая группа представлена неполными минеральными балансами вулканогенных пород и диорит-пегматита с валовым содержанием Zn 0.005–0.0088% (Геохимия мезозойских..., 1984; Нестеренко, Альмухамедов, 1973). Здесь в породообразующих минералах, Ti-магнетите, ильмените находится 50.8–60.4% масс Zn. Предполагалось, что около половины ее сконцентрировано в ближе не определенных цинковых минералах. Более корректно изучены только метасоматиты и руды Fe- и Cu-скарновых месторождений Турьинской группы (Григорьев, 1999). Установлено, что микрочастицы сфалерита ( $< 100$  мкм) появляются в метасоматитах и рудах при валовом содержании Zn граничном между кларковым и повышенным. При валовом содержании Zn 0.03–0.073% в частицах сфалерита  $> 10$  мкм сконцентрировано 36–57% масс Zn. Эти данные косвенно подтверждают мнение о том, что приведенные выше величины среднего содержания сфалерита в горных породах можно рассматривать только как минимально возможные.

**Кадмий.** До 1999 г. были предприняты две попытки определения минеральных балансов Cd в габброидах с содержанием Cd  $(4–8)10^{-5}$ % (Нестеренко, Альмухамедов, 1973; Vincent, Bilefield, 1966). Установлено, что в породообразующих минералах, Ti-магнетите и ильмените находится 51.5–76.1% масс Cd. Формы нахождения остальных масс Cd не установлены. Более корректно изучены метасоматиты и руды Fe- и Cu-скарновых месторождений Турьинской группы с валовым содержанием Cd  $1 \cdot 10^{-5}$ –0.0011% (Григорьев, 1999). Здесь в трех пробах из четырех максиминералом является сфалерит. В нем сконцентрировано 8–32% масс Cd.

**Ртуть.** Изучены только метасоматиты и руды уральских месторождений с валовым содержанием Hg  $6.6 \cdot 10^{-6}$ – $4.1 \cdot 10^{-5}$ %. Максиминералы не установлены, но в некоторых пробах магнетитовых руд и андрадитовых скарнов предполагается наличие ближе неопределенного концентратора Hg. В нем, возможно, сконцентрировано до 15% масс Hg.

#### 10.4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Представления о среднем содержании Zn, Cd и Hg в горных породах основаны на недостаточном количестве исходных данных. Это требует осторожного отношения и к цифрам, характеризующим роль максиминералов. Результаты минералогических анализов горных пород свидетельствуют о том, что роль эта относительно мала, однако полученные цифры основаны на неполных исходных данных. При расчетах средних содержаний максиминералов не учтены самородная ртуть и киноварь грубообломочных осадочных пород (Воронов, 1999), поскольку нет сведений о вариациях содержания этих минералов. При количественных минералогических анализах обычно не учитывали микрочастицы акцессорных минералов  $< 10$ –50 мкм. Возможности учета более крупных частиц цинковых, кадмиевых и ртутных

минералов, вероятно, не всегда были реализованы из-за очень малых содержаний последних в горных породах. Таким образом, цифры, характеризующие роль максиминералов, минимально возможные. В отношении Zn и Cd это косвенно подтверждается наиболее корректными определениями их минеральных балансов в околорудных метасоматитах.

### 10.5. Выводы

Установлено, что в верхней части континентальной коры среднее содержание Zn  $0.0075\%$ , Cd –  $6.4 \cdot 10^{-5} \%$ , Hg –  $6.5 \cdot 10^{-5}$ . В сфалерите сконцентрировано  $0.31\%$  всей массы Zn и  $0.32\%$  всей массы Cd. В максиминералах сконцентрировано  $0.771\%$  всей массы Hg, в том числе в киновари –  $0.757$ , в метатиннабарите –  $0.01$ , в блеклых рудах –  $0.003$ , в реальгаре –  $0.001\%$ .

Полученные данные дают лишь самое первое представление о возможном уровне средних содержаний Zn, Hg и, особенно, Cd в горных породах, а также о вероятной роли максиминералов в качестве носителей этих элементов. По расчету, роль максиминералов относительно мала, но полученные данные минимально возможные. Для их уточнения необходимы новые определения вариаций содержаний Zn, Cd и Hg и их максиминералов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры.

#### 11.1. СКАНДИЙ, ИТТРИЙ И ЛАНТАН

##### 11.1.1. Среднее содержание и распределение масс Sc, Y и La в верхней части континентальной коры

Большинство приводимых здесь (табл. 11.1) данных о среднем содержании Sc, Y и La в горных породах соответствует данным, опубликованным раньше (Григорьев, 2003), лишь часть средних содержаний Sc исправлена с учетом результатов анализов, опубликованных в последние годы (Маслов и др., 2004; Мизенс и др., 2006; Слабунов и др., 2007; Condie et al., 2001; Di Leo et al., 2002; Huber et al., 2001). Соответствующие этим данным величины средних содержаний в верхней части континентальной коры, %: Sc 0.00156 и Y 0.00256 несколько больше величин: Sc 0.0007–0.0015% и Y 0.00174–0.0024%, публиковавшихся другими исследователями (Rudnick, Gao, 2004). Приводимое здесь среднее содержание La 0.00324% находится в пределах публиковавшихся величин 0.00284–0.0071%. Среднее содержание Sc в ассоциации осадочных пород 0.00097% меньше, чем 0.0013% – того, которое могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава, однако разница не выходит за пределы возможных погрешностей. Остальные два элемента умеренно-избыточные. Их среднее содержание в ассоциации осадочных пород (Y 0.0029 и La 0.0032%) несколько больше того, которое могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава: Y 0.002 и La 0.0027% (расчет изоалюминиевым методом). Главные концентраторы: Sc – основные магматические породы и продукты их метаморфизма, Y и La – граниты и гранодиориты. Главные носители Sc, Y и La метаморфические породы гранитно-гнейсового слоя (табл. 11.1), в которых находится больше половины масс данных элементов: Sc 71.98, Y 51.7 и La 59.5%.

##### 11.1.2. Доли масс Y и La, сконцентрированные в максиминералах

Sc, Y и La образуют собственные минералы и нередко концентрируются в чужих. Их повышенное содержание характерно для многих минералов, в частности для гидроксилсодержащих цепочечных и листовых силикатов Fe и Mg. Высокое содержание этих элементов нередко отмечается в редкоземельных, ниобиевых, танталовых, циркониевых, титановых, урановых, и некоторых других акцессорных минералах. Граничные для максиминералов содержания соответственно, %: Sc 0.3, Y 0.4 и La 0.3 (Григорьев, 1999а).

Таблица 11.1

**Распределение масс Sc, Y и La в ассоциации горных пород верхней части континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород, % | Среднее содержание, n·10 <sup>-4</sup> % |              |              | Доли масс, % |             |             |
|-------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
|                                           |                | Sc                                       | Y            | La           | Sc           | Y           | La          |
| Пески и песчаники                         | 5.11           | 6                                        | 29           | 20           | 1.97         | 5.8         | 3.2         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4           | 15                                       | 31           | 48           | 10           | 12.6        | 15.4        |
| Карбонатные породы                        | 3.85           | 1.7                                      | 30           | 7            | 0.42         | 4.5         | 0.8         |
| Кремнистые породы                         | 0.33           | 4.5                                      | Не опр.      | 16           | 0.1          | Не опр.     | 0.2         |
| Эвапориты                                 | 0.26           | Не опр.                                  | Не опр.      | Не опр.      | Не опр.      | Не опр.     | Не опр.     |
| Кислые вулканы                            | 0.44           | 4.2                                      | 24           | 31           | 0.12         | 0.4         | 0.4         |
| Средние вулканы                           | 1.13           | 15                                       | 19           | 28           | 1.09         | 0.8         | 1           |
| Основные вулканы                          | 2.11           | 31                                       | 25           | 19           | 4.19         | 2.1         | 1.2         |
| Граниты                                   | 8.21           | 6.5                                      | 50           | 48           | 3.42         | 16          | 12.2        |
| Гранодиориты                              | 3.38           | 13                                       | 36           | 51           | 2.82         | 4.8         | 5.3         |
| Базиты                                    | 1.5            | 30                                       | 23           | 17           | 2.89         | 1.3         | 0.8         |
| Сиениты                                   | 0.05           | 3                                        | 17           | 45           | 0.01         | < 0.1       | 0.1         |
| Ультрабазиты                              | 0.05           | 12                                       | 2            | 3.9          | 0.04         | < 0.1       | < 0.1       |
| Метапесчаники                             | 2.92           | 5.4                                      | 15           | 22           | 1.01         | 1.7         | 2           |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56          | 16                                       | 24           | 32           | 31.34        | 28.6        | 30.2        |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13           | 1.8                                      | 4            | 26           | 0.13         | 0.2         | 0.9         |
| Железистые породы                         | 0.38           | Не опр.                                  | 20           | Не опр.      | Не опр.      | 0.3         | Не опр.     |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21          | 21                                       | 17           | 33           | 31.24        | 15.4        | 23.6        |
| Метариолиты                               | 0.66           | 8.6                                      | 53           | 20           | 0.36         | 1.4         | 0.4         |
| Метаандезиты                              | 1.03           | 11                                       | 24           | 34           | 0.73         | 1           | 1.1         |
| Метабазиты                                | 3.29           | 34                                       | 24           | 12           | 7.17         | 3.1         | 1.2         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>     | <b>15.6</b>                              | <b>25.61</b> | <b>32.38</b> | <b>99.04</b> | <b>100</b>  | <b>100</b>  |
| Осадочные породы                          | 19.95          | 9.7                                      | 29.37        | 31.76        | 12.49        | 22.9        | 19.6        |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68           | 23                                       | 23.04        | 23.2         | 5.4          | 3.3         | 2.6         |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b>23.63</b>   | <b>11.7</b>                              | <b>28.39</b> | <b>30.43</b> | <b>17.89</b> | <b>26.2</b> | <b>22.2</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19          | 10.9                                     | 43.03        | 45.08        | 9.17         | 22.1        | 18.3        |
| Параметаморфиты                           | 34.99          | 14.4                                     | 22.57        | 30.63        | 32.48        | 30.8        | 33.1        |
| Ортометаморфиты                           | 28.19          | 22                                       | 18.92        | 30.29        | 39.5         | 20.9        | 26.4        |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой в целом</b>    | <b>76.37</b>   | <b>16.6</b>                              | <b>24.75</b> | <b>32.99</b> | <b>81.15</b> | <b>73.8</b> | <b>77.8</b> |

Таблица 11.2

**Роль максиминералов как носителей Y в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Y в минералах, % | Осадочный слой          |                | Гранитно-гнейсовый слой |                | Верхняя часть континентальной коры |                |
|--------------|-----------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|
|              |                             | Содержание минералов, % | Доли масс Y, % | Содержание минералов, % | Доли масс Y, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Y, % |
| Чевкинит     | 0.47                        | Не опр.                 | Не опр.        | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | <0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01         |
| Ортит        | 1                           | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.02           | 0.0063                  | 2.52           | 0.0048                             | 1.85           |
| Уранинит     | 1.5                         | $9.3 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.01           | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | < 0.01         |
| Монацит      | 2.9                         | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.05           | 0.0016                  | 1.86           | 0.0013                             | 1.45           |
| Рабдофан     | 6                           | Не опр.                 | Не опр.        | $4.7 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01         | $3.3 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01         |
| Делоренцит   | 8.4                         | Не опр.                 | Не опр.        | $8.6 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01         | $6.6 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01         |
| Эвксенит     | 10.2                        | Не опр.                 | Не опр.        | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.04           | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.03           |
| Фергусонит   | 18.2                        | Не опр.                 | Не опр.        | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.02           | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.02           |
| Иттриалит    | 22.8                        | Не опр.                 | Не опр.        | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.19           | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.14           |
| Бломстрандин | 26.5                        | Не опр.                 | Не опр.        | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01           | $9 \cdot 10^{-7}$                  | 0.01           |
| Гадолинит    | 33                          | Не опр.                 | Не опр.        | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.07           | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.06           |
| Ксенотим     | 48.2                        | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.17           | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.89           | $3.7 \cdot 10^{-5}$                | 0.69           |
| Всего        |                             | $1 \cdot 10^{-4}$       | 0.24           | 0.008                   | 5.61           | 0.0062                             | 4.25           |

Таблица 11.3

**Роль максиминералов как носителей La в верхней части континентальной коры**

| Минералы   | Содержание La в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|            |                              | Содержание минералов, % | Доли масс La, % | Содержание минералов, % | Доли масс La, % | Содержание минералов, %            | Доли масс La, % |
| Иттриалит  | 0.32                         | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | < 0.01          | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | < 0.01          |
| Фергусонит | 1.1                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | < 0.01          |
| Ортит      | 4                            | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.08            | 0.0063                  | 7.64            | 0.0048                             | 6               |
| Гадолинит  | 5.7                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.01            |
| Чевкинит   | 9                            | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Монацит    | 13                           | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.2             | 0.0016                  | 6.3             | 0.0013                             | 5.28            |
| Бастнезит  | 14                           | Не опр.                 | Не опр.         | 0.00042                 | 1.78            | 0.00032                            | 1.4             |
| Всего      |                              | $1.1 \cdot 10^{-4}$     | 0.28            | 0.0084                  | 15.73           | 0.0064                             | 12.69           |

Максиминералами Sc, Y и La могут быть не только их собственные минералы, но и некоторые чужие. Данных о вариациях скандиевых минералов в горных породах мало, а среди нескандиевых нет таких, где бы преобладало содержание Sc > 0.3%, поэтому вопрос о роли скандиевых максиминералов в верхней части континентальной коры пока остается открытым. Средние содержания максиминералов Y и La в горных породах рассчитаны по опубликованным результатам количественных минералогических анализов более чем 2480 проб горных пород. Источники исходных данных приведены в предшествующих разделах, в частности в разделе 6.2.2.

Согласно полученным данным, роль максиминералов как носителей Y и La существенна в гранитно-гнейсовом слое и верхней части континентальной коры в целом (табл. 11.2, 11.3). В горных породах осадочного слоя эта роль минимальна (табл. 11.4, 11.5). Она максимальна в сиенитах и грани-



Таблица 11.4

**Доли масс Y (%), сконцентрированные в иттриевых максиминералах  
континентальных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы       |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые                     | Средние                    | В целом                      |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 1.25 (0.003)               | 0.05 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.17 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Уранинит | Не опр.                      | Не опр.                        | 0.03 ( $5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | < 0.01 ( $6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Монацит  | 0.13 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.03 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 1.21 (0.001)               | Не опр.                    | 0.15 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Ксенотим | 0.66 ( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.17 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.6 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )  | Не опр.                    | 0.08 ( $3.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Всего    | 0.79 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.2 ( $4.3 \cdot 10^{-5}$ )    | 3.09 (0.0041)              | 0.05 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.4 ( $5.2 \cdot 10^{-4}$ )  |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 11.5

**Доли масс La (%), сконцентрированные в лантановых максиминералах  
континентальных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы |                            |                            |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые               | Средние                    | В целом                    |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 3.87 (0.003)         | 0.14 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.7 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )  |
| Монацит  | 0.85 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.13 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 4.19 (0.001)         | Не опр.                    | 0.68 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Всего    | 0.85 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.13 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )     | 8.06 (0.004)         | 0.14 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 1.38 ( $5 \cdot 10^{-4}$ ) |

Таблица 11.6

**Доли масс Y (%), сконцентрированные в иттриевых максиминералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                        | Гранодиориты                 | Сиениты                      | Магматические породы в целом   |
|--------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Чевкинит     | < 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 0.17 ( $6 \cdot 10^{-4}$ )   | < 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Ортит        | 1.6 (0.008)                    | 0.83 (0.003)                 | 13.53 (0.023)                | 1.35 (0.0058)                  |
| Уранинит     | 0.02 ( $7.8 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.02 ( $4.9 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Монацит      | 2.49 (0.0043)                  | 0.32 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   | 4.09 (0.0024)                | 1.89 (0.0028)                  |
| Рабдофан     | < 0.01 ( $4 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                      | < 0.01 ( $2.5 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Делоренцит   | Не опр.                        | Не опр.                      | 0.06 ( $1.3 \cdot 10^{-5}$ ) | < 0.01 ( $5 \cdot 10^{-8}$ )   |
| Эвксенит     | 0.16 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                      | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.12 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     |
| Фергусонит   | 0.06 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.16 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.04 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.08 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Иттриалит    | 0.91 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.64 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Бломстрандин | 0.05 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                      | 5.14 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.04 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Гадолинит    | 0.33 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                      | 0.06 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.23 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )     |
| Ксенотим     | 1.93 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | 0.04 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.08 ( $2.7 \cdot 10^{-6}$ ) | 1.46 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Всего        | 7.55 (0.013)                   | 1.35 (0.0034)                | 23.17 (0.026)                | 5.83 (0.0089)                  |

Таблица 11.7

**Доли масс La (%), сконцентрированные в лантановых максиминералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы   | Граниты                          | Гранодиориты                 | Сиениты                          | Магматические породы в целом     |
|------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Иттриалит  | 0.01 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )       | Не опр.                      | Не опр.                          | 0.01 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )     |
| Фергусонит | $< 0.01$ ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | $< 0.01$ ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | $< 0.01$ ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Ортит      | 6.67 (0.008)                     | 2.35 (0.003)                 | 20.44 (0.023)                    | 5.16 (0.0058)                    |
| Гадолинит  | 0.06 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )       | Не опр.                      | $< 0.01$ ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.04 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )       |
| Чевкинит   | $< 0.01$ ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 1.2 (0.0006)                     | 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ )     |
| Монацит    | 11.65 (0.0043)                   | 1.02 (0.0004)                | 6.93 (0.0024)                    | 8.09 (0.0028)                    |
| Бастнезит  | 1.37 (0.00047)                   | Не опр.                      | Не опр.                          | 0.9 (0.00029)                    |
| Всего      | 19.76 (0.013)                    | 3.38 (0.0034)                | 28.57 (0.026)                    | 14.21 (0.0091)                   |

Таблица 11.8

**Доли масс Y (%), сконцентрированные в иттриевых максиминералах  
метаморфических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы | Параметаморфические породы |                            |                            | Ортометаморфические породы     |                                |                                |
|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|          | Метапесчаники              | Парасланцы                 | В целом                    | Гранито-гнейсы                 | Метариолиты                    | В целом                        |
| Ортит    | 0.8 (0.0012)               | 3.33 (0.008)               | 3.09 (0.0071)              | 3.88 (0.0066)                  | 1.51 (0.008)                   | 2.95 (0.0056)                  |
| Уранинит | Не опр.                    | Не опр.                    | Не опр.                    | $< 0.01$ ( $6 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                        | $< 0.01$ ( $5 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Монацит  | 0.58 ( $3 \cdot 10^{-4}$ ) | 1.09 ( $9 \cdot 10^{-4}$ ) | 1.01 ( $8 \cdot 10^{-4}$ ) | 4.61 (0.0027)                  | $< 0.01$ ( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 3.36 (0.0022)                  |
| Ксенотим | Не опр.                    | Не опр.                    | Не опр.                    | 2.13 ( $7.5 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                        | 1.57 ( $6.2 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Всего    | 1.38 (0.0015)              | 4.42 (0.0089)              | 4.1 (0.0079)               | 10.62 (0.0094)                 | 1.51 (0.008)                   | 7.88 (0.0079)                  |

Таблица 11.9

**Доли масс La (%), сконцентрированные в лантановых максиминералах  
метаморфических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы  | Параметаморфические породы |                |                | Ортометаморфические породы |                            |                |
|-----------|----------------------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------|
|           | Метапесчаники              | Парасланцы     | В целом        | Гранито-гнейсы             | Метариолиты                | В целом        |
| Ортит     | 2.18 (0.0012)              | 10 (0.008)     | 9.16 (0.0071)  | 8 (0.0066)                 | 16 (0.008)                 | 7.47 (0.0056)  |
| Монацит   | 1.77 (0.0003)              | 3.66 (0.0009)  | 3.36 (0.0008)  | 10.64 (0.0027)             | 0.01 ( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 9.53 (0.0022)  |
| Бастнезит | Не опр.                    | Не опр.        | Не опр.        | 5.09 (0.0012)              | Не опр.                    | 4.67 (0.001)   |
| Всего     | 3.95 (0.0015)              | 13.66 (0.0089) | 12.52 (0.0079) | 23.73 (0.0105)             | 16.01 (0.008)              | 21.67 (0.0088) |

тах (табл. 11.6, 11.7), а среди метаморфических пород – в гранито-гнейсах (табл. 11.8, 11.9). В дополнение к данным табл. 11.8 и 11.9 отметим, что в метабазитах установлен монацит (среднее содержание  $4 \cdot 10^{-8} \%$ ), но сконцентрированные в нем доли масс Y и La  $< 0.01 \%$ .

### 11.1.3. Обсуждение полученных данных

Приводимые здесь данные о среднем содержании Sc, Y и La в горных породах подробнее полученных другими авторами, но нуждаются в уточнении. Наиболее вероятно преуменьшение среднего содержания Sc и Y в сиенитах, Y – гранито-гнейсах, La – гранитах. Но для коррекции отмеченных данных нужно не только накопление аналитических данных, но и совершенствование модели верхней части континентальной коры. Вопрос о роли максиминералов в качестве носителей Sc пока остается открытым. Наиболее рациональный путь его решения – определение закономерностей вариаций содержания скандиевых разновидностей относительно распространенных минералов, но для этого необходима постановка специальных исследований. Исходные данные о вариациях содержаний максиминералов Y и La в горных породах получены микрообогачительными методами. Были учтены лишь частицы крупностью 50–250 или  $> 30$ –50 мкм. Таким образом, полученные данные соответствуют не истинным, а минимально возможным значениям содержания максиминералов Y и La в горных породах.

Возможности сопоставления полученных данных с результатами определений минеральных балансов Sc, Y и La в конкретных разностях горных пород малы. По магматическим и метаморфическим породам данные эпизодические, а по осадочным породам отсутствуют.

**Скандий.** Минеральные балансы определены исключительно в пробах горных пород с содержанием Sc, близким к кларковому (Григорьев, 1999). Во всех случаях Sc находится в чужих минералах. В шошонитах, гранитах, гранодиоритах, ультрабазитах минералами-концентраторами являются амфиболы и слюды. В метасоматитах Светлинского золоторудного месторождения и продуктах их выветривания минералами-концентраторами Sc являются также титанит, рутил, циркон, однако содержание Sc в этих минералах невысокое. Максиминералы не обнаружены.

**Иттрий.** Из вулканогенных пород изучен лишь юрский гиалориолит из Забайкалья (Геохимия мезозойских..., 1984), где содержание Y 0.008%. Максиминералы не обнаружены. Два баланса Y в гранитах определила В.Н. Павлова (Солодов и др., 1987). Содержание Y повышенное: 0.0078 и 0.0096%. Максиминералы циртолит, торит и Fe-торит, в одной из проб еще колумбит и пироксенол. В максиминералах сконцентрировано 48 и 41% масс Y. И.Н. Бушляковым (Бушляков, Соболев, 1976) изучены гранодиорит и кварцевый диорит Верхисетского массива на Урале. Содержание Y пониженное 0.00091 и 0.002%. Максиминералы не установлены. В.И. Коваленко с коллегами (1970) изучены две пробы щелочных пегматитов из Сибири. Содержание Y повышенное: 0.014 и 0.032%. Максиминерал циркон. В нем сконцентрировано 79 и 50% масс Y. В.А. Макрыгиной с соавторами (1980) изучены 4 пробы параметаморфических пород Хамардабанского массива в Сибири. Содержа-

ние Y околокларковое: 0.0016–0.0035%. Максимины не установлены. Изучены: кварцево-диопсидовый плагиосланец из Алданской флогопитоносной провинции (Петрова, Смирнова, 1982) и мигматит из Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984). Содержание Y в первом практически кларковое (0.0023%), во втором – повышенное (0.0077%). В первом максимины не установлены, во втором – максиминерал апатит, в котором сконцентрировано 45% масс Y. Изучен кварцево-слюдистый метасоматит Светлинского золоторудного месторождения с содержанием Y 0.0025% (Корово-мантийное..., 1989). Максимины не обнаружены.

**Лантан.** Из вулканогенных пород изучены лишь гиалориолит и латит из Забайкалья (Геохимия мезозойских..., 1984). Здесь содержание La соответственно 0.002 и 0.0041%. Максимины не обнаружены. Во включениях перидотитов из вулканических шлаков Западной Германии, содержащих  $1.6 \cdot 10^{-4} \% \text{ La}$ , его максимины не установлены (Stosch, Seck, 1980). Не обнаружены они и в плагиосланцах из Алданской флогопитоносной провинции, содержащих 0.0041% La (Петрова, Смирнова, 1982). В.А. Макрыгина и В.В. Смирнова (1984) изучили две пробы плагиогнейсов и одну – мигматита из Северного Прибайкалья с содержанием La 0.006–0.0093%. Максиминерал ортит. В нем сконцентрировано 56–61% масс La.

В целом, очевидно, что немногочисленные минеральные балансы отражают в основном индивидуальные особенности изученных горных пород. Они свидетельствуют о сложных закономерностях вариаций роли максиминов как носителей Y и La.

#### 11.1.4. Выводы

В верхней части континентальной коры среднее содержание, %: Sc – 0.0016, Y – 0.0026 и La – 0.0032. Главные концентраторы Sc основные магматические породы и продукты их метаморфизма. Главные концентраторы Y и La граниты и гранодиориты. Главные носители Sc, Y и La – метаморфические породы. В них находится больше половины масс данных элементов: Sc 71.98, Y 51.7 и La 59.5%.

Роль максиминов как носителей Sc определить не удалось. В максиминералах сконцентрировано 4.25% масс Y, в том числе в ортите – 1.85, монаците – 1.45, ксенотиме – 0.69, иттриалите – 0.14, гадолините – 0.06, эвксените – 0.03, фергусоните – 0.02, блонстрандине – 0.01%. В максиминералах сконцентрировано 12.69% масс La, в том числе в ортите – 6, монаците – 5.28, бастнезите – 1.4, гадолините – 0.01%. Эти цифры минимально возможные.

### 11.2. ЦЕРИЙ, ПРАЗЕОДИМ, НЕОДИМ, САМАРИЙ

#### 11.2.1. Среднее содержание и распределение масс Ce, Pr, Nd и Sm в верхней части континентальной коры

Приводимые здесь (табл. 11.10) данные о средних содержаниях Ce, Pr, Nd, Sm в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах соответствуют данным, опубликованным раньше (Григорьев, 2003б):

Таблица 11.10

## Распределение Ce, Pr, Nd и Sm в ассоциации горных пород верхней части континентальной коры

| Горные породы                             | Масса пород, % | Среднее содержание, $\text{н} \cdot 10^{-4} \%$ |             |              |             | Доли масс, % |             |             |             |
|-------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|                                           |                | Ce                                              | Pr          | Nd           | Sm          | Ce           | Pr          | Nd          | Sm          |
| Пески и песчаники                         | 5.11           | 39                                              | 4.3         | 16           | 3.8         | 3.2          | 2.5         | 2.8         | 3.4         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4           | 75                                              | 10          | 36           | 8           | 12.4         | 12          | 12.8        | 14.6        |
| Карбонатные породы                        | 3.85           | 12                                              | 2.6         | 6.6          | 1.9         | 0.7          | 1.2         | 0.9         | 1.3         |
| Кремнистые породы                         | 0.33           | 15                                              | Не опр.     | 7            | Не опр.     | 0.1          | Не опр.     | 0.1         | Не опр.     |
| Эвапориты                                 | 0.26           | Не опр.                                         | Не опр.     | Не опр.      | Не опр.     | Не опр.      | Не опр.     | Не опр.     | Не опр.     |
| Кислые вулканиты                          | 0.44           | 58                                              | 10          | 27           | 5.2         | 0.4          | 0.5         | 0.4         | 0.4         |
| Средние вулканиты                         | 1.13           | 50                                              | 4           | 20           | 4.3         | 0.9          | 0.5         | 0.8         | 0.9         |
| Основные вулканиты                        | 2.11           | 43                                              | 4.7         | 21           | 5.1         | 1.4          | 1.1         | 1.5         | 1.9         |
| Граниты                                   | 8.21           | 72                                              | 7.4         | 31           | 7.5         | 9.4          | 7           | 8.7         | 10.8        |
| Гранодиориты                              | 3.38           | 75                                              | 6.4         | 23           | 8.2         | 4            | 2.5         | 2.7         | 4.9         |
| Базиты                                    | 1.5            | 48                                              | 5           | 22           | 5.3         | 1.1          | 0.9         | 1.1         | 1.4         |
| Сиениты                                   | 0.05           | 95                                              | 10          | 42           | 10          | 0.1          | 0.1         | 0.1         | 0.1         |
| Ультрабазиты                              | 0.05           | 8.6                                             | 1.4         | 4.8          | 0.83        | <0.1         | <0.1        | <0.1        | <0.1        |
| Метапесчаники                             | 2.92           | 37                                              | 5.2         | 24           | 3.4         | 1.7          | 1.7         | 2.4         | 1.7         |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56          | 76                                              | 11          | 36           | 6.4         | 36.8         | 38.6        | 37.7        | 34.4        |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13           | 51                                              | 4.6         | 23           | 2.4         | 0.9          | 0.6         | 0.9         | 0.5         |
| Железистые породы                         | 0.38           | Не опр.                                         | Не опр.     | Не опр.      | Не опр.     | Не опр.      | Не опр.     | Не опр.     | Не опр.     |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21          | 65                                              | 11          | 32           | 5.1         | 23.9         | 29.4        | 25.4        | 20.8        |
| Метариолиты                               | 0.66           | 43                                              | 3.1         | 11           | 2.7         | 0.5          | 0.2         | 0.2         | 0.3         |
| Метаандезиты                              | 1.03           | 69                                              | Не опр.     | Не опр.      | 2.6         | 1.1          | Не опр.     | Не опр.     | 0.5         |
| Метабазиты                                | 3.29           | 26                                              | 3.2         | 13           | 3.7         | 1.4          | 1.2         | 1.5         | 2.1         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>     | <b>63.07</b>                                    | <b>8.7</b>  | <b>29.19</b> | <b>5.69</b> | <b>100</b>   | <b>100</b>  | <b>100</b>  | <b>100</b>  |
| Осадочные породы                          | 19.95          | 51.65                                           | 6.82        | 24.26        | 5.51        | 16.4         | 15.7        | 16.6        | 19.3        |
| Вулканиты осадочного слоя                 | 3.68           | 47                                              | 5.12        | 21.4         | 4.87        | 2.7          | 2.1         | 2.7         | 3.2         |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b>23.63</b>   | <b>50.92</b>                                    | <b>6.55</b> | <b>23.81</b> | <b>5.41</b> | <b>19.1</b>  | <b>17.8</b> | <b>19.3</b> | <b>22.5</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19          | 69.9                                            | 6.86        | 27.87        | 7.41        | 14.6         | 10.5        | 12.6        | 17.2        |
| Параметаморфиты                           | 34.99          | 71.11                                           | 10.19       | 34.19        | 5.95        | 39.4         | 40.9        | 41          | 36.6        |
| Ортометаморфиты                           | 28.19          | 60.07                                           | 9.5         | 28.13        | 4.79        | 26.9         | 30.8        | 27.1        | 23.7        |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой в целом</b>    | <b>76.37</b>   | <b>66.83</b>                                    | <b>9.36</b> | <b>30.86</b> | <b>5.77</b> | <b>80.9</b>  | <b>82.2</b> | <b>80.7</b> | <b>77.5</b> |

Ce 0.0063 и Nd 0.0029% находятся в пределах величин: Ce 0.00575–0.00664, Nd 0.000256–0.00304%, опубликованных другими исследователями (Rudnick, Gao, 2004); Pr 0.00087 и Sm 0.000569% несколько больше величин, публиковавшихся другими исследователями: Pr 0.00063–0.00071 и Sm 0.000459–0.000509 (Rudnick, Gao, 2004). Распределение Ce, Pr, Nd и Sm в верхней части континентальной коры почти соответствует требованиям геохимического баланса. Среднее содержание во всей ассоциации осадочных пород (Ce 0.0052, Pr 0.00068, Nd 0.0024 и Sm 0.00055%) близко к тому, которое могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (Ce 0.0055, Pr 0.00077, Nd 0.0025, Sm 0.00047% (расчет изоалюминиевым методом).

Главные концентраторы всех четырех элементов – сиениты, осадочные породы и продукты их метаморфизма. Больше половины масс всех четырех элементов сосредоточены в осадочных и параметаморфических породах: Ce 55.8, Pr 56.6, Nd 57.6 и Sm 55.9%.

### 11.2.2. Доли масс Ce и Pr, сконцентрированные в максиминералах

Ce и Pr максимально концентрируются в цериевых минералах, но высокое их содержание характерно также для иттриевых, ниобиевых, танталовых, циркониевых, титановых, урановых, ториевых, некоторых кальциевых минералов. Повышенное содержание Ce и Pr часто отмечается в гидроксилсодержащих цепочечных и листовых силикатах Fe и Mg. Граничные для цериевых и празеодимовых максиминералов содержания соответственно: Ce 0.5 и Pr 0.06% (Григорьев, 1999). В данной работе учтены только те максиминералы, где среднее содержание Ce и Pr больше отмеченного. Для определения их роли использованы опубликованные результаты количественных минералогических анализов горных пород. Первоисточники материалов приведены в предшествующих разделах, в частности в разделе 6.2.2, а также 12.2.2.

Согласно полученным данным, роль максиминералов как носителей Ce и Pr существенна в гранитно-гнейсовом слое и верхней части континентальной коры в целом (табл. 11.11, 11.12). Из горных пород осадочного слоя изучены только пески, кислые и средние вулканиты. Роль максиминералов наиболее значительна в кислых вулканитах (табл. 11.13, 11.14). В гранитно-гнейсовом слое роль максиминералов максимальна в сиенитах и гранитах (табл. 11.15, 11.16), а среди метаморфических пород в гранито-гнейсах и метариолитах (табл. 11.17, 11.18). В дополнение к данным табл. 11.17, 11.18 отметим, что в метабазитах установлен монацит (среднее содержание  $4 \cdot 10^{-8} \%$ ), но сконцентрированные в нем доли масс Ce и Pr  $< 0.01 \%$ .

Возможности сопоставления полученных данных с результатами изучения распределения Ce и Pr по минералам горных пород минимальные. В большинстве случаев или недостаточно данных для расчета минеральных балансов, или велики погрешности определения содержаний Ce и Pr в минералах. Автором учтено всего 9 минеральных балансов (Ce – 7 и Pr – 2), где суммы долей масс Ce и Pr, сконцентрированных в минералах, не выходят за пределы 90–110% от масс этих элементов, соответствующих результатам анализов изученных проб горных пород.

Таблица 11.11

**Роль максиминералов как носителей Се в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Се в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Се, % | Содержание минералов, % | Доли масс Се, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Се, % |
| Уранинит     | 0.8                          | $9.3 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | < 0.01          |
| Бломстрандин | 1.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $9 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Пироклор     | 1.4                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.3 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $1 \cdot 10^{-6}$                  | < 0.01          |
| Иттриалит    | 1.8                          | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.01            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | < 0.01          |
| Эвдиалит     | 2.7                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.5 \cdot 10^{-5}$     | 0.01            | $1.1 \cdot 10^{-5}$                | < 0.01          |
| Фергусонит   | 3.8                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | < 0.01          |
| Гадолинит    | 4.5                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $4 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Ринколит     | 6.7                          | Не опр.                 | Не опр.         | $6.9 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $5.3 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Ортит        | 7.4                          | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.09            | 0.0063                  | 6.96            | 0.0048                             | 5.64            |
| Лопарит      | 14                           | Не опр.                 | Не опр.         | $1.3 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $1 \cdot 10^{-6}$                  | < 0.01          |
| Чевкинит     | 18.1                         | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Монацит      | 24.5                         | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.22            | 0.0016                  | 5.85            | 0.0013                             | 5.06            |
| Бастнезит    | 24.9                         | Не опр.                 | Не опр.         | $4.2 \cdot 10^{-4}$     | 1.56            | $3.2 \cdot 10^{-4}$                | 1.26            |
| Рабдофан     | 27.6                         | Не опр.                 | Не опр.         | $4.3 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $3.3 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Вейншенкит   | 28.1                         | Не опр.                 | Не опр.         | $4.8 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01          | $3.7 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01          |
| Всего        |                              | $1 \cdot 10^{-4}$       | 0.31            | 0.0084                  | 14.39           | 0.0065                             | 11.96           |

Таблица 11.12

**Роль максиминералов как носителей Рг в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Рг в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Рг, % | Содержание минералов, % | Доли масс Рг, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Рг, % |
| Бломстрандин | 0.07                         | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $9 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Иттриалит    | 0.23                         | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.01            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | < 0.01          |
| Ортит        | 0.88                         | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.08            | 0.0063                  | 5.9             | 0.0048                             | 4.86            |
| Фергусонит   | 1.1                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | < 0.01          |
| Чевкинит     | 1.68                         | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Гадолинит    | 2.3                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.01            |
| Бастнезит    | 3.3                          | Не опр.                 | Не опр.         | $4.2 \cdot 10^{-4}$     | 1.47            | $3.2 \cdot 10^{-4}$                | 1.21            |
| Монацит      | 4                            | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.28            | 0.0016                  | 6.81            | 0.0013                             | 5.98            |
| Всего        |                              | $1.06 \cdot 10^{-4}$    | 0.36            | 0.0084                  | 14.2            | 0.0065                             | 12.06           |

Таблица 11.13

**Доли масс Се (%), сконцентрированные в максиминералах горных пород осадочного слоя континентальной коры**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы       |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые                     | Средние                    | В целом                      |
| Уранинит | Не опр.                      | Не опр.                        | 0.01 ( $5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | < 0.01 ( $6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 3.83 (0.003)               | 0.15 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.63 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Монацит  | 0.82 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.16 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 4.22 (0.001)               | Не опр.                    | 0.63 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Всего    | 0.82 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.16 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 8.06 (0.0041)              | 0.15 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 1.26 ( $5 \cdot 10^{-4}$ )   |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 11.14

**Доли масс Рг (%), сконцентрированные в максиминералах горных пород осадочного слоя континентальной коры**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы         |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые                       | Средние                    | В целом                      |
| Уранинит | Не опр.                      | Не опр.                        | < 0.01 ( $5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | < 0.01 ( $6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 2.64 (0.003)                 | 0.22 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.69 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Монацит  | 1.21 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.19 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 4 (0.001)                    | Не опр.                    | 0.94 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Всего    | 1.21 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.19 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 6.64 (0.004)                 | 0.22 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 1.63 ( $1.6 \cdot 10^{-4}$ ) |

Таблица 11.15

**Доли масс Се (%), сконцентрированные в максиминералах магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                        | Гранодиориты                 | Сиениты                        | Магматические породы в целом   |
|--------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Уранинит     | 0.01 ( $7.8 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                        | 0.01 ( $4.9 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Бломстрандин | < 0.01 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 0.04 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ )   | < 0.01 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Пирохлор     | < 0.01 ( $5 \cdot 10^{-6}$ )   | < 0.01 ( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.01 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )     | < 0.01 ( $4 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Иттриалит    | 0.05 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                      | Не опр.                        | 0.03 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Эвдиалит     | Не опр.                        | Не опр.                      | 6.54 (0.023)                   | 0.03 ( $8.7 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Фергусонит   | 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.02 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | < 0.01 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Гадолинит    | 0.03 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                      | < 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.02 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )     |
| Ринколит     | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                        | < 0.01 ( $4 \cdot 10^{-8}$ )   |
| Ортит        | 8.22 (0.008)                   | 2.96 (0.003)                 | 17.92 (0.023)                  | 6.13 (0.0058)                  |
| Лопарит      | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-6}$ ) | < 0.01 ( $6 \cdot 10^{-7}$ ) | 2.51 (0.0017)                  | 0.02 ( $7.7 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Чевкинит     | < 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 1.14 ( $6 \cdot 10^{-4}$ )     | 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Монацит      | 14.63 (0.0043)                 | 1.31 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   | 6.19 (0.0024)                  | 9.8 (0.0028)                   |
| Бастнезит    | 1.63 ( $4.7 \cdot 10^{-4}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                        | 1.03 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Рабдофан     | 0.02 ( $4 \cdot 10^{-6}$ )     | Не опр.                      | Не опр.                        | 0.01 ( $2.5 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Вейншенкит   | < 0.01 ( $4.5 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                      | Не опр.                        | < 0.01 ( $2.8 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Всего        | 24.6 (0.0131)                  | 4.29 (0.0034)                | 34.35 (0.052)                  | 17.1 (0.009)                   |

Таблица 11.16

**Доли масс Рг (%), сконцентрированные в максиминералах магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                        | Гранодиориты                 | Сиениты                        | Магматические породы в целом   |
|--------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Бломстрандин | < 0.01 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 0.02 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ )   | < 0.01 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Иттриалит    | 0.06 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                      | Не опр.                        | 0.04 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Ортит        | 9.51 (0.008)                   | 4.13 (0.003)                 | 20.2 (0.023)                   | 7.4 (0.0058)                   |
| Фергусонит   | 0.02 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.06 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | < 0.01 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.03 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Чевкинит     | < 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 1.01 ( $6 \cdot 10^{-4}$ )     | 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Гадолинит    | 0.16 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                      | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )     | 0.1 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )      |
| Бастнезит    | 2.1 ( $4.7 \cdot 10^{-4}$ )    | Не опр.                      | Не опр.                        | 1.39 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Монацит      | 23.24 (0.0043)                 | 2.5 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )    | 9.6 (0.0024)                   | 16.2 (0.0028)                  |
| Всего        | 35.1 (0.013)                   | 6.68 (0.0033)                | 30.9 (0.0263)                  | 25.2 (0.009)                   |



Таблица 11.17

**Доли масс Се (%), сконцентрированные в максиминералах  
метаморфических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы  | Параметаморфические породы    |                              |                               | Ортометаморфические породы      |                               |                                 |
|-----------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|           | Метапесчаники                 | Парасланцы                   | В целом                       | Гранито-гнейсы                  | Метариолиты                   | В целом                         |
| Уранинит  | Не опр.                       | Не опр.                      | Не опр.                       | < 0.01<br>(6·10 <sup>-7</sup> ) | Не опр.                       | < 0.01<br>(5·10 <sup>-7</sup> ) |
| Пироклор  | Не опр.                       | Не опр.                      | Не опр.                       | < 0.01<br>(2·10 <sup>-6</sup> ) | Не опр.                       | < 0.01<br>(2·10 <sup>-6</sup> ) |
| Ортит     | 2.4<br>(0.0012)               | 7.79<br>(0.008)              | 7.4<br>(0.0071)               | 7.51<br>(0.0066)                | 13.77<br>(0.008)              | 6.91<br>(0.0056)                |
| Монацит   | 1.99<br>(3·10 <sup>-4</sup> ) | 2.9<br>(9·10 <sup>-4</sup> ) | 2.76<br>(8·10 <sup>-4</sup> ) | 10.18<br>(0.0027)               | 0.01<br>(2·10 <sup>-6</sup> ) | 8.98<br>(0.0022)                |
| Бастнезит | Не опр.                       | Не опр.                      | Не опр.                       | 4.6<br>(0.0012)                 | Не опр.                       | 4.15<br>(0.001)                 |
| Всего     | 4.39<br>(0.0015)              | 10.69<br>(0.0089)            | 10.16<br>(0.0079)             | 22.29<br>(0.0098)               | 13.78<br>(0.008)              | 20.04<br>(0.0088)               |

Таблица 11.18

**Доли масс Рг (%), сконцентрированные в максиминералах  
метаморфических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы  | Параметаморфические породы    |                               |                              | Ортометаморфические породы |                               |                   |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------|
|           | Метапесчаники                 | Парасланцы                    | В целом                      | Гранито-гнейсы             | Метариолиты                   | В целом           |
| Ортит     | 2.03<br>(0.0012)              | 6.4<br>(0.008)                | 6.25<br>(0.0071)             | 5.28<br>(0.0066)           | 22.7<br>(0.008)               | 5.19<br>(0.0056)  |
| Бастнезит | Не опр.                       | Не опр.                       | Не опр.                      | 3.6<br>(0.0012)            | Не опр.                       | 3.47<br>(0.001)   |
| Монацит   | 2.31<br>(3·10 <sup>-4</sup> ) | 3.27<br>(9·10 <sup>-4</sup> ) | 3.2<br>(8·10 <sup>-4</sup> ) | 9.82<br>(0.0027)           | 0.03<br>(2·10 <sup>-6</sup> ) | 9.26<br>(0.0022)  |
| Всего     | 4.34<br>(0.0015)              | 9.67<br>(0.0089)              | 9.45<br>(0.0079)             | 18.7<br>(0.0105)           | 22.73<br>(0.008)              | 17.92<br>(0.0088) |

**Церий.** В юрском латите из Забайкалья (Геохимия мезозойских..., 1984) содержание Се 0.009%, максиминералы не обнаружены; в двух пробах шонитов с острова Стромболи, содержащих 0.012 и 0.0102% Се, его максиминералы не обнаружены; в кварцево-диопсидовом и диопсид-скаполитовом плагиосланцах из Алданской флогопитоносной провинции (Петрова, Смирнова, 1982) содержание Се 0.0072 и 0.01%, максиминералы не установлены; в мигматите и плагиогнейсе из Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984) содержание Се 0.018 и 0.011%; в максиминералах – ортите (главный) и апатите (второстепенный) сконцентрировано соответственно 78 и 57% масс Се.

**Празеодим.** В.А. Макрыгина и В.В. Смирнова (1984) изучили две пробы мигматитов из Северного Прибайкалья с содержанием Рг

0.003–0.0044%, в обеих максиминерал ортит, в котором сконцентрировано 71 и 40% массы Се.

Таким образом, эпизодические минеральные балансы отражают в основном индивидуальные особенности изученных горных пород.

### 11.2.3. Доли масс Nd и Sm, сконцентрированные в максиминералах

Роль максиминералов как носителей Nd и Sm существенна в гранитно-гнейсовом слое и верхней части континентальной коры в целом (табл. 11.19, 11.20). В осадочном слое изучены только пески, кислые и средние вулканиты. Роль максиминералов значительна в кислых вулканитах (табл. 11.21, 11.22), максимальна в гранитах и сиенитах (табл. 11.23, 11.24). Мннее значительна она в гранито-гнейсах и метаридолитах (табл. 11.25, 11.26). Дополнительно отметим, что в метабазах установлен монацит (среднее содержание  $4 \cdot 10^{-8} \%$ ), но сконцентрированные в нем доли масс Nd и Sm  $< 0.01\%$ .

Возможности сопоставления полученных данных с результатами изучения распределения Nd и Sm по минералам горных пород минимальные. В большинстве случаев или недостаточно данных для расчета минеральных балансов, или велики погрешности определения содержаний Nd и Sm в минералах. Суммы учтенных долей масс Nd и Sm в минералах составляют 26–128% от масс, соответствующих содержаниям Nd и Sm в исследованных пробах горных пород по результатам их анализа. Автором учтено всего 9 минеральных балансов (Nd – 7 и Sm – 2). Это в основном балансы, где суммы учтенных долей масс Nd и Sm не выходят за пределы 90–110% от масс этих элементов, установленных при анализах горных пород. Исключение сделано для недостаточно точных, но подробных данных о распределении Nd и Sm в совокупности минералов гранодиорита из батолита Восточный

Таблица 11.19

#### Роль максиминералов как носителей Nd в верхней части континентальной коры

| Минералы     | Содержание Nd в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Nd, % | Содержание минералов, % | Доли масс Nd, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Nd, % |
| Эвксенит     | 0.5                          | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | $< 0.01$        | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | $< 0.01$        |
| Бломстрандин | 0.8                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | $< 0.01$        | $9 \cdot 10^{-7}$                  | $< 0.01$        |
| Иттриалит    | 1.41                         | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.01            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.01            |
| Ортит        | 2.1                          | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.05            | 0.0063                  | 4.27            | 0.0048                             | 3.48            |
| Бастнезит    | 2.3                          | Не опр.                 | Не опр.         | $4.2 \cdot 10^{-4}$     | 0.31            | $3.2 \cdot 10^{-4}$                | 0.25            |
| Ринколит     | 2.7                          | Не опр.                 | Не опр.         | $6.9 \cdot 10^{-9}$     | $< 0.01$        | $5.3 \cdot 10^{-9}$                | $< 0.01$        |
| Фергусонит   | 3.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | $< 0.01$        | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | $< 0.01$        |
| Чевкинит     | 7.4                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | $< 0.01$        | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | $< 0.01$        |
| Гадолинит    | 8.5                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.01            |
| Монацит      | 12                           | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.23            | 0.0016                  | 6.19            | 0.0013                             | 5.38            |
| Сумма        |                              | $1.06 \cdot 10^{-4}$    | 0.28            | 0.0083                  | 10.79           | 0.0064                             | 9.13            |

Таблица 11.20

**Роль максиминералов как носителей Sm в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Sm в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Sm, % | Содержание минералов, % | Доли масс Sm, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Sm, % |
| Ортит        | 0.38                         | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.04            | 0.0063                  | 4.13            | 0.0048                             | 3.2             |
| Ринколит     | 0.5                          | Не опр.                 | Не опр.         | $6.9 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $5.3 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Бастнезит    | 0.5                          | Не опр.                 | Не опр.         | $4.2 \cdot 10^{-4}$     | 0.36            | $3.2 \cdot 10^{-4}$                | 0.28            |
| Эвксенит     | 0.7                          | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.01            |
| Бломстрандин | 0.9                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $9 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Чевкинит     | 1                            | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Иттриалит    | 1.16                         | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.04            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.03            |
| Монацит      | 1.7                          | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.15            | 0.0016                  | 4.69            | 0.0013                             | 3.88            |
| Фергусонит   | 2                            | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.01            |
| Гадолинит    | 2.27                         | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.02            | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.02            |
| Всего        |                              | $1.06 \cdot 10^{-4}$    | 0.19            | 0.0083                  | 9.26            | 0.0064                             | 7.43            |

Таблица 11.21

**Доли масс Nd (%), сконцентрированные в максиминералах горных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые               | Средние                    | В целом                      |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 2.33 (0.003)         | 0.11 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.4 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )    |
| Монацит  | 0.98 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.17 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 4.44 (0.001)         | Не опр.                    | 0.69 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Всего    | 0.98 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.17 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 6.77 (0.004)         | 0.11 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 1.09 ( $5.2 \cdot 10^{-4}$ ) |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 11.22

**Доли масс Sm (%), сконцентрированные в максиминералах горных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые               | Средние                    | В целом                      |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 2.19 (0.003)         | 0.09 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.31 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Монацит  | 0.58 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.1 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )    | 3.27 (0.001)         | Не опр.                    | 0.42 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Всего    | 0.58 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.1 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )      | 5.46 (0.004)         | 0.09 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.73 ( $5 \cdot 10^{-4}$ )   |

Пенинсуляр Ренджес (Gromet, Silver, 1983). Здесь суммы учтенных долей масс соответственно 128 и 111 отн. %.

**Неодим.** В гиалориолите и латите (Геохимия мезозойских..., 1984) из Забайкалья, содержащих Nd 0.0024 и 0.004%, его максиминералы не обнаружены; в шошоните с о-ва Стромболи, содержащем 0.005% Nd, максиминералы тоже не обнаружены (Francalanci, 1989); в гранодиорите из батоли-

Таблица 11.23

**Доли масс Nd (%), сконцентрированные в максиминералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                          | Гранодиориты                 | Сиениты                          | Магматические породы в целом     |
|--------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Эвксенит     | 0.01 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )       | Не опр.                      | $< 0.01$ ( $8 \cdot 10^{-8}$ )   | 0.01 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )       |
| Бломстрандин | $< 0.01$ ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 0.06 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ )     | $< 0.01$ ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Иттриалит    | 0.09 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )       | Не опр.                      | Не опр.                          | 0.06 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )     |
| Ортит        | 5.42 (0.008)                     | 2.74 (0.003)                 | 11.5 (0.023)                     | 4.35 (0.0058)                    |
| Бастнезит    | 0.35 ( $4.7 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                      | Не опр.                          | 0.24 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ )     |
| Фергусонит   | 0.02 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.05 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | $< 0.01$ ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.02 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ )     |
| Чевкинит     | $< 0.01$ ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 1.06 ( $6 \cdot 10^{-4}$ )       | 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ )     |
| Гадолинит    | 0.14 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )       | Не опр.                      | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )       | 0.09 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )       |
| Монацит      | 16.6 (0.0043)                    | 2.09 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   | 6.86(0.0024)                     | 12(0.0028)                       |
| Всего        | 22.63 (0.013)                    | 4.88 (0.0034)                | 19.48 (0.0263)                   | 16.69 (0.0091)                   |

Таблица 11.24

**Доли масс Sm (%), сконцентрированные в максиминералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                          | Гранодиориты                | Сиениты                        | Магматические породы в целом     |
|--------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Ортит        | 4.05 (0.008)                     | 1.39 (0.003)                | 8.7 (0.023)                    | 2.98 (0.0058)                    |
| Бастнезит    | 0.31 ( $4.7 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                     | Не опр.                        | 0.2 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ )      |
| Эвксенит     | 0.07 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )       | Не опр.                     | $< 0.01$ ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.05 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )       |
| Бломстрандин | 0.01 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ )     | Не опр.                     | 0.3 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ )    | 0.01 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ )     |
| Чевкинит     | $< 0.01$ ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                     | 0.6 (0.0006)                   | $< 0.01$ ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Иттриалит    | 0.31 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )       | Не опр.                     | Не опр.                        | 0.19 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )     |
| Монацит      | 9.75 (0.0043)                    | 0.83 (0.0004)               | 4.08 (0.0024)                  | 6.43 (0.0028)                    |
| Фергусонит   | 0.04 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.08( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.01 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.05 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ )     |
| Гадолинит    | 0.15 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )       | Не опр.                     | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )     | 0.09 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )       |
| Всего        | 14.69 (0.013)                    | 2.3 (0.0034)                | 13.7 (0.026)                   | 10 (0.0091)                      |

Таблица 11.25

**Доли масс Nd (%), сконцентрированные в максиминералах  
метаморфических пород континентальной коры**

| Минералы  | Параметаморфические породы |                         |                            | Ортометаморфические породы |                            |                |
|-----------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|
|           | Метапесчаники              | Парасланцы              | В целом                    | Гранито-гнейсы             | Метариолиты                | В целом        |
| Ортит     | 1.05 (0.0012)              | 4.67 (0.008)            | 4.39 (0.0071)              | 4.33 (0.0066)              | 15.3 (0.008)               | 4.2 (0.0056)   |
| Бастнезит | Не опр.                    | Не опр.                 | Не опр.                    | 0.86 (0.0012)              | Не опр.                    | 0.82 (0.001)   |
| Монацит   | 1.5 ( $3 \cdot 10^{-4}$ )  | 3 ( $9 \cdot 10^{-4}$ ) | 2.82 ( $8 \cdot 10^{-4}$ ) | 10.1 (0.0027)              | 0.02 ( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 9.43 (0.0022)  |
| Всего     | 2.55 (0.0015)              | 7.67 (0.0089)           | 7.21 (0.0079)              | 15.29 (0.0094)             | 15.32 (0.008)              | 13.63 (0.0079) |

Доли масс Sm (%), сконцентрированные в максиминералах метаморфических пород

| Минералы  | Параметаморфические породы |                  |                  | Ортометаморфические породы |                               |                   |
|-----------|----------------------------|------------------|------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------|
|           | Метапесчаники              | Парасланцы       | В целом          | Гранито-гнейсы             | Метариолиты                   | В целом           |
| Ортит     | 1.34<br>(0.0012)           | 4.75<br>(0.008)  | 4.5<br>(0.0071)  | 4.92<br>(0.0066)           | 11.3<br>(0.008)               | 4.43<br>(0.0056)  |
| Монацит   | 1.5<br>(0.0003)            | 2.39<br>(0.0009) | 2.27<br>(0.0008) | 9<br>(0.0027)              | 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 7.79<br>(0.0022)  |
| Бастнезит | Не опр.                    | Не опр.          | Не опр.          | 1.18 (0.0012)              | Не опр.                       | 1.04 (0.001)      |
| Всего     | 2.84<br>(0.0015)           | 7.14<br>(0.0089) | 6.76<br>(0.0079) | 15.1<br>(0.0105)           | 11.31<br>(0.008)              | 13.26<br>(0.0088) |

та Восточный Пенинсуляр Ренджес (Gromet, Silver, 1983) содержание Nd 0.0025%, максиминералы здесь титанит и ортит, доли масс Nd в них соответственно 70 и 50 отн.%; в диопсид-плагиоклазовом и диопсид-скаполит-плагиоклазовом плагиосланцах из Алданской флогопитоносной провинции (Петрова, Смирнова, 1982) содержание Nd 0.0045 и 0.0039%; в первом максиминерал титанит, в котором сконцентрировано 58% масс Nd, во втором максиминералы не установлены; в плагиогнейсе из Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984) содержание Nd 0.012%, максиминералы ортит (главный) и титанит (второстепенный), в которых сконцентрировано 68% масс Nd.

**Самарий.** В шошоните с о-ва Стромболи, содержащем  $9.5 \cdot 10^{-4}$  % Nd, максиминералы не обнаружены (Francalanci, 1989); в гранодиорите из батолита Восточный Пенинсуляр Ренджес (Gromet, Silver, 1983) содержание Nd  $4.3 \cdot 10^{-4}$  %, максиминерал титанит, в котором сконцентрировано 98% масс Sm.

Эпизодические минеральные балансы отражают в основном индивидуальные особенности изученных горных пород.

#### 11.2.4. Обсуждение полученных данных

Приводимые данные о среднем содержании Ce, Pr, Nd и Sm в верхней части континентальной коры близки к литературным. Это косвенно свидетельствует о том, что данные о среднем содержании Ce, Pr, Nd и Sm в горных породах на этом этапе исследований могут считаться достаточно корректными.

Исходные данные о вариациях содержаний акцессорных минералов в горных породах, как отмечалось выше, преуменьшены, поэтому приведенные здесь оценки роли максиминералов как носителей Ce, Pr, Nd и Sm – минимально возможные. Отмеченные немногочисленные минеральные балансы Ce, Pr, Nd и Sm отражают в основном индивидуальные особенности изученных горных пород. Сопоставление их позволяет предполагать, что значительная роль максиминералов характерна для горных пород с повышенным содержанием суммы лантаноидов.

### 11.2.5. Выводы

Средние содержания в верхней части континентальной коры, %: Ce – 0.0063, Pr – 0.00087, Nd – 0.0029, Sm – 0.00057. Главные концентраторы всех четырех элементов сиениты, осадочные породы и продукты их метаморфизма. Больше половины масс всех четырех элементов сосредоточены в осадочных и параметаморфических породах: Ce – 55.8, Pr – 56.6, Nd – 57.6 и Sm – 55.9%.

В верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 11.96% масс Ce, в том числе ортите – 5.64, монаците – 5.06, бастнезите – 1.26%; 12.06% масс Pr, в том числе монаците – 5.98, ортите – 4.86, бастнезите – 1.21; 9.13% масс Nd, в том числе монаците – 5.38, ортите – 3.48, бастнезите – 0.25, иттриалите – 0.01, гадолините – 0.01%; 7.43% масс Sm, в том числе монаците – 3.88, ортите – 3.2, бастнезите – 0.28, иттриалите – 0.03, гадолините – 0.02, эвксените 0.01, фергусоните – 0.01%. Эти цифры минимально возможные.

## 11.3. ЕВРОПИЙ, ГАДОЛИНИЙ, ТЕРБИЙ И ДИСПРОЗИЙ

### 11.3.1. Среднее содержание и распределение масс Eu, Gd, Tb и Dy в верхней части континентальной коры

Приводимые здесь (табл. 11.27) средние содержания Eu, Gd, Tb и Dy в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2003б),  $\cdot 10^{-4}$  %: Eu 1.3, Gd 6.3, Tb 0.89 и Dy 4.8, но они несколько больше опубликованных другими исследователями: Eu 0.88–1.21, Gd 2.8–4.21, Tb 0.48–0.7 и Dy 2.9–3.9 (Rudnick, Gao, 2004). Однако разница в большинстве случаев не превосходит возможных погрешностей. Все четыре элемента «недостаточные». Их средние содержания в совокупности континентальных осадочных пород (Eu  $9.4 \cdot 10^{-5}$ , Gd  $4 \cdot 10^{-4}$ , Tb  $6.9 \cdot 10^{-5}$  и Dy  $3.6 \cdot 10^{-4}$  %) меньше того, которое могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава, соответственно, %: Eu –  $1.1 \cdot 10^{-4}$ , Gd –  $5.7 \cdot 10^{-4}$ , Tb –  $7.7 \cdot 10^{-5}$  и Dy –  $4.2 \cdot 10^{-4}$  (расчет изоалюминиевым методом).

Главные концентраторы всех четырех элементов сиениты, но роль их как носителей Eu, Gd, Tb и Dy очень мала. Больше половины масс всех четырех элементов сосредоточено в метаморфических породах, %: Eu – 67.46, Gd – 70.93, Tb – 64.3 и Dy – 68.2.

### 11.3.2. Доли масс Eu и Gd, сконцентрированные в максиминералах

Эти элементы максимально концентрируются в редкоземельных минералах, но повышенное их содержание характерно также для ниобиевых, танталовых, циркониевых, титановых, урановых, ториевых и некоторых кальциевых минералов. Кроме того, повышенные содержания Eu и Gd часто отмечаются в гидроксилсодержащих цепочечных и листовых силикатах

Таблица 11.27

## Распределение Eu, Gd, Tb и Dy в ассоциации горных пород верхней части континентальной коры

| Горные породы                             | Масса пород, % | Среднее содержание, $\cdot 10^{-4}$ % |             |              |             | Доли масс, %  |              |             |              |
|-------------------------------------------|----------------|---------------------------------------|-------------|--------------|-------------|---------------|--------------|-------------|--------------|
|                                           |                | Eu                                    | Gd          | Tb           | Dy          | Eu            | Gd           | Tb          | Dy           |
| Пески и песчаники                         | 5.11           | 0.84                                  | 2.8         | 0.7          | 2.9         | 3.31          | 2.27         | 4           | 3.1          |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4           | 1.2                                   | 5.8         | 0.83         | 4.4         | 9.62          | 9.56         | 9.7         | 9.6          |
| Карбонатные породы                        | 3.85           | 0.5                                   | 1.5         | 0.38         | 2.9         | 1.48          | 0.92         | 1.6         | 2.3          |
| Кремнистые породы                         | 0.33           | 0.28                                  | Не опр.     | 0.22         | 1.5         | 0.07          | Не опр.      | 0.1         | 0.1          |
| Эвапориты                                 | 0.26           | Не опр.                               | Не опр.     | Не опр.      | Не опр.     | Не опр.       | Не опр.      | Не опр.     | Не опр.      |
| Кислые вулканиты                          | 0.44           | 1.5                                   | 5           | 0.82         | 6           | 0.51          | 0.35         | 0.4         | 0.6          |
| Средние вулканиты                         | 1.13           | 1.2                                   | 4.5         | 0.71         | 3           | 1.05          | 0.81         | 0.9         | 0.7          |
| Основные вулканиты                        | 2.11           | 1.6                                   | 5.1         | 0.95         | 5.1         | 2.6           | 1.71         | 2.3         | 2.3          |
| Граниты                                   | 8.21           | 1.4                                   | 6.8         | 1.1          | 5           | 8.86          | 8.85         | 10.2        | 8.6          |
| Гранодиориты                              | 3.38           | 1.4                                   | 6.1         | 1.3          | 5.2         | 3.65          | 3.27         | 5           | 3.7          |
| Базиты                                    | 1.5            | 1.3                                   | 5.2         | 0.83         | 2.5         | 1.5           | 1.24         | 1.4         | 0.8          |
| Сиениты                                   | 0.05           | 1.8                                   | 10          | 1.6          | 7           | 0.07          | 0.08         | 0.1         | 0.1          |
| Ультрабазиты                              | 0.05           | 0.24                                  | 0.93        | 0.2          | 0.28        | 0.01          | 0.01         | < 0.1       | < 0.1        |
| Метапесчаники                             | 2.92           | 0.76                                  | 4.3         | 0.48         | 4.9         | 1.71          | 1.99         | 1.6         | 3            |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56          | 1.4                                   | 7.5         | 0.94         | 5.7         | 32.99         | 36.32        | 32.4        | 36.5         |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13           | 0.6                                   | 2.2         | 0.15         | 2.1         | 0.52          | 0.39         | 0.2         | 0.5          |
| Железистые породы                         | 0.38           | Не опр.                               | Не опр.     | Не опр.      | Не опр.     | Не опр.       | Не опр.      | Не опр.     | Не опр.      |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21          | 1.5                                   | 8.1         | 0.94         | 5.2         | 26.84         | 29.79        | 24.6        | 25.3         |
| Метариолиты                               | 0.66           | 1.3                                   | 3.9         | 0.68         | Не опр.     | 0.66          | 0.41         | 0.5         | Не опр.      |
| Метаандезиты                              | 1.03           | 1.5                                   | Не опр.     | 1.5          | Не опр.     | 1.19          | Не опр.      | 1.7         | Не опр.      |
| Метабазиты                                | 3.29           | 1.4                                   | 3.9         | 0.88         | 4.2         | 3.55          | 2.03         | 3.3         | 2.9          |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>     | <b>1.297</b>                          | <b>6.31</b> | <b>0.887</b> | <b>4.77</b> | <b>100.19</b> | <b>100</b>   | <b>99.9</b> | <b>100.1</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95          | 0.94                                  | 4.03        | 0.689        | 3.62        | 14.48         | 12.75        | 15.4        | 15.1         |
| Вулканиты осадочного слоя                 | 3.68           | 1.47                                  | 4.91        | 0.861        | 4.56        | 4.16          | 2.87         | 3.6         | 3.6          |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b>23.63</b>   | <b>1</b>                              | <b>4.17</b> | <b>0.716</b> | <b>3.77</b> | <b>18.64</b>  | <b>15.62</b> | <b>19.0</b> | <b>18.7</b>  |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19          | 1.39                                  | 6.41        | 1.12         | 4.76        | 14.09         | 13.45        | 16.7        | 13.2         |
| Параметаморфиты                           | 34.99          | 1.3                                   | 6.98        | 0.866        | 5.46        | 35.22         | 38.7         | 34.2        | 40           |
| Ортометаморфиты                           | 28.19          | 1.48                                  | 7.22        | 0.947        | 4.77        | 32.24         | 32.23        | 30.1        | 28.2         |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой в целом</b>    | <b>76.37</b>   | <b>1.38</b>                           | <b>6.97</b> | <b>0.94</b>  | <b>5.08</b> | <b>81.55</b>  | <b>84.38</b> | <b>80.9</b> | <b>81.4</b>  |

Таблица 11.28

**Роль максиминералов как носителей Eu в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Eu в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Eu, % | Содержание минералов, % | Доли масс Eu, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Eu, % |
| Ортит        | 0.019                        | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.01            | 0.0063                  | 0.86            | 0.0048                             | 0.7             |
| Бломстрандин | 0.02                         | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $9 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Ринколит     | 0.03                         | Не опр.                 | Не опр.         | $6.9 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $5.3 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Иттриалит    | 0.042                        | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.01            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.01            |
| Монацит      | 0.09                         | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.04            | 0.0016                  | 1.03            | 0.0013                             | 0.9             |
| Бастнезит    | 0.1                          | Не опр.                 | Не опр.         | $4.2 \cdot 10^{-4}$     | 0.3             | $3.2 \cdot 10^{-4}$                | 0.25            |
| Чевкинит     | 0.13                         | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Фергусонит   | 0.3                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.01            |
| Сумма        |                              | $1.06 \cdot 10^{-4}$    | 0.05            | 0.0083                  | 2.21            | 0.0064                             | 1.87            |

Таблица 11.29

**Роль максиминералов как носителей Gd в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Gd в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Gd, % | Содержание минералов, % | Доли масс Gd, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Gd, % |
| Ортит        | 0.19                         | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.03            | 0.0063                  | 1.71            | 0.0048                             | 1.45            |
| Бастнезит    | 0.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $4.2 \cdot 10^{-4}$     | 0.12            | $3.2 \cdot 10^{-4}$                | 0.1             |
| Чевкинит     | 0.7                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Эвксенит     | 1                            | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.01            |
| Бломстрандин | 1.1                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $9 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Монацит      | 1.2                          | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.13            | 0.0016                  | 2.74            | 0.0013                             | 2.48            |
| Гадолинит    | 1.9                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.01            |
| Ксенотим     | 2                            | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.05            | $5 \cdot 10^{-5}$       | 0.14            | $3.7 \cdot 10^{-5}$                | 0.13            |
| Иттриалит    | 2.06                         | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.06            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.05            |
| Фергусонит   | 3                            | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.01            |
| Всего        |                              | $1.06 \cdot 10^{-4}$    | 0.21            | 0.0083                  | 4.8             | 0.0064                             | 4.24            |

Fe и Mg. Граничные для максиминералов содержания (Григорьев, 1999) соответственно Eu 0.01 и Gd 0.03%. Первая цифра новая, при ее определении в качестве эталонного минерала был выбран вейншенкит (максимальное содержание Eu 0.98%). В данной работе учтены только те редкоземельные минералы, которые обычно являются европиевыми и гадолиниевыми максиминералами, чаще всего монацит и ортит. В гранитоидах максиминералом этих элементов бывает титанит, но данных для определения его роли в этом качестве пока недостаточно.

Среднее содержание максиминералов в горных породах определено по результатам минералогических анализов (в основном количественных), опубликованных в литературе. Первоисточники приведены в предшествующих разделах, в частности в разделе 6.2.2. Согласно полученным данным, роль максиминералов как носителей Eu и Gd существенна в гранитно-гнейсовом слое и верхней части континентальной коры в целом



Таблица 11.30

**Доли масс Eu (%), сконцентрированные в максиминералах  
горных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые               | Средние                    | В целом                      |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.38 (0.003)         | 0.02 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.05 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Монацит  | 0.14 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.03 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.6 (0.001)          | Не опр.                    | 0.07 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Всего    | 0.14 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.03 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.98 (0.004)         | 0.02 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.12 ( $5.2 \cdot 10^{-4}$ ) |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 11.31

**Доли масс Gd (%), сконцентрированные в максиминералах  
горных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы       |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые                     | Средние                    | В целом                      |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 1.14 (0.003)               | 0.04 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.16 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Монацит  | 0.56 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.1 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )    | 2.4 (0.001)                | Не опр.                    | 0.29 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Ксенотим | 0.29 ( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.05 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )     | 0.12 ( $3 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | 0.02 ( $3.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Всего    | 0.85 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.15 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )     | 3.66 (0.004)               | 0.04 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.47 ( $5 \cdot 10^{-4}$ )   |

Таблица 11.32

**Доли масс Eu (%), сконцентрированные в максиминералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                        | Гранодиориты                 | Сиениты                      | Магматические породы в целом   |
|--------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Ортит        | 1.09 (0.008)                   | 0.41 (0.003)                 | 2.43 (0.023)                 | 0.79 (0.0058)                  |
| Бломстрандин | < 0.01 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 0.04 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ ) | < 0.01 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Иттриалит    | 0.06 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.04 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Монацит      | 2.76 (0.0043)                  | 0.26 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   | 1.2 (0.0024)                 | 1.8 (0.0028)                   |
| Бастнезит    | 0.34 ( $4.7 \cdot 10^{-4}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.21 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Чевкинит     | < 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 0.43 ( $6 \cdot 10^{-4}$ )   | < 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Фергусонит   | 0.03 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.07 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.01 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.04 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Всего        | 4.28 (0.013)                   | 0.74 (0.0034)                | 4.11 (0.0263)                | 2.88 (0.0091)                  |

(табл. 11.28, 11.29). Из горных пород осадочного слоя изучены только пески, кислые и средние вулканиты. Роль максиминералов наиболее значительна в следующих горных породах: кислых вулканитах (табл. 11.30, 11.31), гранитах, сиенитах (табл. 11.32, 11.33), гранито-гнейсах (табл. 11.34, 11.35). В дополнение к данным табл. 11.34 и 11.35 отметим, что в метабазилах установлен монацит (среднее содержание  $4 \cdot 10^{-8}$  %), но сконцентрированные в нем доли масс Eu и Gd < 0.01%.

Таблица 11.33

**Доли масс Gd (%), сконцентрированные в максиминералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                        | Гранодиориты                 | Сиениты                      | Магматические породы в целом   |
|--------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Ортит        | 2.24 (0.008)                   | 0.93 (0.003)                 | 8.4 (0.023)                  | 1.72 (0.0058)                  |
| Бастнезит    | 0.14 ( $4.7 \cdot 10^{-4}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.09 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Чевкинит     | < 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 0.81 (0.0006)                | < 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Эвксенит     | 0.12 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                      | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.08( $5 \cdot 10^{-5}$ )      |
| Бломстрандин | 0.01 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                      | 0.7 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ )  | 0.01 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Монацит      | 7.59 (0.0043)                  | 0.79 (0.0004)                | 5.54 (0.0024)                | 5.25 (0.0028)                  |
| Гадолинит    | 0.14 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                      | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.09 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )     |
| Ксенотим     | 0.59 (0.0002)                  | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.01 ( $2.7 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.31 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Иттриалит    | 0.61 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.39 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Фергусонит   | 0.07 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.16 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.02 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.08 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Всего        | 11.51 (0.013)                  | 1.89 (0.0034)                | 15.49 (0.026)                | 8.02 (0.0091)                  |

Таблица 11.34

**Доли масс Eu (%), сконцентрированные в максиминералах метаморфических пород**

| Минералы  | Параметаморфические породы    |                               |                               | Ортометаморфические породы |                                 |                  |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|
|           | Метапесчаники                 | Парасланцы                    | В целом                       | Гранито-гнейсы             | Метариолиты                     | В целом          |
| Ортит     | 0.3<br>(0.0012)               | 1.09<br>(0.008)               | 1.04<br>(0.0071)              | 0.84<br>(0.0066)           | 1.17<br>(0.008)                 | 0.71<br>(0.0056) |
| Монацит   | 0.36<br>( $3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.58<br>( $9 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.55<br>( $8 \cdot 10^{-4}$ ) | 1.62<br>(0.0027)           | < 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 1.32<br>(0.0022) |
| Бастнезит | Не опр.                       | Не опр.                       | Не опр.                       | 0.8<br>(0.0012)            | Не опр.                         | 0.67<br>(0.001)  |
| Всего     | 0.66<br>(0.0015)              | 1.67<br>(0.0089)              | 1.59<br>(0.0079)              | 3.26<br>(0.0094)           | 1.17<br>(0.008)                 | 2.7<br>(0.0079)  |

Таблица 11.35

**Доли масс Gd (%), сконцентрированные в максиминералах метаморфических пород**

| Минералы  | Параметаморфические породы |                  |                  | Ортометаморфические породы     |                               |                                 |
|-----------|----------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|           | Метапесчаники              | Парасланцы       | В целом          | Гранито-гнейсы                 | Метариолиты                   | В целом                         |
| Ортит     | 0.53<br>(0.0012)           | 2.03<br>(0.008)  | 1.93<br>(0.0071) | 1.55<br>(0.0066)               | 3.9<br>(0.008)                | 1.48<br>(0.0056)                |
| Бастнезит | Не опр.                    | Не опр.          | Не опр.          | 0.3<br>(0.0012)                | Не опр.                       | 0.28<br>(0.001)                 |
| Монацит   | 0.84<br>(0.0003)           | 1.44<br>(0.0009) | 1.37<br>(0.0008) | 4 (0.0027)                     | 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 3.67<br>(0.0022)                |
| Ксенотим  | Не опр.                    | Не опр.          | Не опр.          | 0.2<br>( $7.5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                       | 0.17<br>( $6.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего     | 1.37<br>(0.0015)           | 3.47<br>(0.0089) | 3.3<br>(0.0079)  | 6.05<br>(0.0105)               | 3.9<br>(0.008)                | 5.6<br>(0.0088)                 |

### 11.3.3. Доли масс Tb и Dy, сконцентрированные в максиминералах

Граничные для максиминералов содержания Tb 0.01 и Dy – 0.06% (Григорьев, 1999). Главные максиминералы ортит и монацит. Роль максиминералов существенна в гранитно-гнейсовом слое и верхней части континентальной коры в целом (табл. 11.36, 11.37). В осадочном слое изучены только пески, кислые и средние вулканиты. В гранитно-гнейсовом слое роль максиминералов значительна: в кислых вулканитах, сиенитах и гранитах (табл. 11.38–11.41), гранито-гнейсах и парасланцах (табл. 11.42, 11.43). В дополнение к данным табл. 11.43 отметим, что в метабазитах в монаците сконцентрировано < 0.01% масс Dy.

Таблица 11.36

Роль максиминералов как носителей Tb в верхней части континентальной коры

| Минералы     | Содержание Tb в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Tb, % | Содержание минералов, % | Доли масс Tb, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Tb, % |
| Ринколит     | 0.01                         | Не опр.                 | Не опр.         | $6.9 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $5.3 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Чевкинит     | 0.045                        | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Эвксенит     | 0.1                          | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.01            |
| Ортит        | 0.13                         | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.11            | 0.0063                  | 8.71            | 0.0048                             | 7.01            |
| Монацит      | 0.16                         | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.1             | 0.0016                  | 2.72            | 0.0013                             | 2.34            |
| Бломстрандин | 0.3                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $9 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Ксенотим     | 0.5                          | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.07            | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.24            | $3.7 \cdot 10^{-5}$                | 0.21            |
| Гадолинит    | 0.5                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.03            | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.02            |
| Иттриалит    | 0.54                         | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.12            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.1             |
| Фергусонит   | 0.8                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.03            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.02            |
| Сумма        |                              | $1.16 \cdot 10^{-4}$    | 0.28            | 0.008                   | 11.86           | 0.0062                             | 9.71            |

Таблица 11.37

Роль максиминералов как носителей Dy в верхней части континентальной коры

| Минералы     | Содержание Dy в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Dy, % | Содержание минералов, % | Доли масс Dy, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Dy, % |
| Ортит        | 0.13                         | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.07            | 0.0063                  | 5.56            | 0.0048                             | 4.5             |
| Монацит      | 0.16                         | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.02            | 0.0016                  | 0.5             | 0.0013                             | 0.43            |
| Ринколит     | 0.23                         | Не опр.                 | Не опр.         | $6.9 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $5.3 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Гадолинит    | 1.5                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.02            | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.01            |
| Эвксенит     | 1.7                          | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.03            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.02            |
| Бломстрандин | 2                            | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $9 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Ксенотим     | 3.7                          | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.1             | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.33            | $3.7 \cdot 10^{-5}$                | 0.29            |
| Иттриалит    | 4.3                          | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.18            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.14            |
| Фергусонит   | 6.1                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.04            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.03            |
| Всего        |                              | $1.16 \cdot 10^{-4}$    | 0.19            | 0.008                   | 6.69            | 0.0062                             | 5.42            |

Таблица 11.38

**Доли масс Tb (%), сконцентрированные в максиминералах пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы       |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые                     | Средние                    | В целом                      |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 4.76 (0.003)               | 0.18 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.6 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )    |
| Монацит  | 0.3 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ )  | 0.08 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 1.95 (0.001)               | Не опр.                    | 0.22 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Ксенотим | 0.29 ( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.07 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.18 ( $3 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | 0.02 ( $3.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Всего    | 0.59 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.15 ( $4.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 6.89 (0.004)               | 0.18 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.84 ( $5.2 \cdot 10^{-4}$ ) |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 11.39

**Доли масс Dy (%), сконцентрированные в максиминералах осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы       |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые                     | Средние                    | В целом                      |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 2.25 (0.003)               | 0.15 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.39 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Монацит  | 0.07 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.02 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.27 (0.001)               | Не опр.                    | 0.04 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Ксенотим | 0.51 ( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.1 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )      | 0.19 ( $3 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | 0.03 ( $3.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Всего    | 0.58 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.12 ( $4.3 \cdot 10^{-5}$ )   | 2.71 (0.004)               | 0.15 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.46 ( $5.2 \cdot 10^{-4}$ ) |

Таблица 11.40

**Доли масс Tb (%), сконцентрированные в максиминералах магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                        | Гранодиориты                | Сиениты                      | Магматические породы в целом   |
|--------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Чевкинит     | < 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                     | 0.17 ( $6 \cdot 10^{-4}$ )   | < 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Эвксенит     | 0.07 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                     | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.05 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     |
| Ортит        | 9.45 (0.008)                   | 3 (0.003)                   | 18.7 (0.023)                 | 6.85 (0.0058)                  |
| Монацит      | 6.25 (0.0043)                  | 0.49 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )  | 2.4 (0.0024)                 | 4.07 (0.0028)                  |
| Бломстрандин | 0.02 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                     | 0.62 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.02 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Ксенотим     | 0.91 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )  | 0.01 ( $2.7 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.59 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Гадолинит    | 0.23 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                     | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.14 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )     |
| Иттриалит    | 0.98 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                     | Не опр.                      | 0.59 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Фергусонит   | 0.11 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.2 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.02 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.13 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Всего        | 18.02 (0.013)                  | 3.7 (0.0034)                | 21.93 (0.0263)               | 12.44 (0.0091)                 |

Таблица 11.41

**Доли масс Dy (%), сконцентрированные в максиминералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                      | Гранодиориты                 | Сиениты                        | Магматические породы в целом |
|--------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Ортит        | 7.2 (0.008)                  | 2.6 (0.003)                  | 14.8 (0.023)                   | 5.44 (0.0058)                |
| Монацит      | 1.38 (0.0043)                | 0.12 (0.0004)                | 0.55 (0.0024)                  | 0.93 (0.0028)                |
| Гадолинит    | 0.15 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                      | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )     | 0.09 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Эвксенит     | 0.27 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                      | $< 0.01$ ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.18 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Бломстрандин | 0.03 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 0.94 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.03 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Ксенотим     | 1.48 (0.0002)                | 0.02 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.01 ( $2.7 \cdot 10^{-6}$ )   | 1 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ )    |
| Иттриалит    | 1.72 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                        | 1.08 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Фергусонит   | 0.18 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.38 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.03 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.23 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего        | 12.41 (0.013)                | 3.12 (0.0034)                | 16.38 (0.026)                  | 8.98 (0.0091)                |

Таблица 11.42

**Доли масс Tb (%), сконцентрированные в максиминералах метаморфических пород**

| Минералы | Параметаморфические породы |                            |                            | Ортометаморфические породы  |                                |                              |
|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
|          | Метапесчаники              | Парасланцы                 | В целом                    | Гранито-гнейсы              | Метариолиты                    | В целом                      |
| Ортит    | 3.25 (0.0012)              | 11.1 (0.008)               | 10.61 (0.0071)             | 9.13 (0.0066)               | Не опр.                        | 7.66 (0.0056)                |
| Монацит  | 1 ( $3 \cdot 10^{-4}$ )    | 1.53 ( $9 \cdot 10^{-4}$ ) | 1.47 ( $8 \cdot 10^{-4}$ ) | 4.6 (0.0027)                | $< 0.01$ ( $4 \cdot 10^{-8}$ ) | 3.71 (0.0022)                |
| Ксенотим | Не опр.                    | Не опр.                    | Не опр.                    | 0.4 ( $7.5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                        | 0.33 ( $6.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего    | 4.25 (0.0015)              | 12.63 (0.0089)             | 12.08 (0.0079)             | 14.13 (0.0094)              | $< 0.01$ ( $4 \cdot 10^{-8}$ ) | 11.7 (0.0079)                |

Таблица 11.43

**Доли масс Dy (%), сконцентрированные в максиминералах метаморфических пород**

| Минералы | Параметаморфические породы |               |               | Ортометаморфические породы   |                                |                              |
|----------|----------------------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
|          | Метапесчаники              | Парасланцы    | В целом       | Гранито-гнейсы               | Метариолиты                    | В целом                      |
| Ортит    | 1.1 (0.0012)               | 6.32 (0.008)  | 5.81 (0.0071) | 5.71 (0.0066)                | 6.92 (0.008)                   | 5.25 (0.0056)                |
| Монацит  | 0.1 (0.0003)               | 0.25 (0.0009) | 0.23 (0.0008) | 0.83 (0.0027)                | $< 0.01$ ( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.73 (0.0022)                |
| Ксенотим | Не опр.                    | Не опр.       | Не опр.       | 0.53 ( $7.5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                        | 0.48 ( $6.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего    | 1.2 (0.0015)               | 6.57 (0.0089) | 6.04 (0.0079) | 7.07 (0.0105)                | 6.92 (0.008)                   | 6.46 (0.0088)                |

#### 11.3.4. Обсуждение полученных данных

Данные о содержании Eu, Gd, Tb и Dy в горных породах получены по результатам относительно немногочисленных анализов и относятся к наименее надежным, поэтому заключение о некоторой избыточности этих элементов в континентальных осадочных породах требует проверки.

Приведенные здесь оценки роли максиминералов как носителей Eu, Gd, Tb и Dy следует считать минимально возможными по причинам, рассмотренным в предыдущих главах.

Возможности сопоставления полученных данных с результатами изучения распределения Eu, Gd, Tb и Dy по минералам в конкретных пробах горных пород почти нет. В большинстве случаев недостаточно данных для расчета минеральных балансов и велики погрешности определения содержаний Eu и Gd в минералах. Суммы учтенных долей масс Eu и Gd в минералах составляют 19–144% от масс, соответствующих содержаниям Eu, Gd, Tb и Dy в исследованных пробах горных пород по результатам их анализа. Автором (Григорьев, 1999) было учтено всего 5 неполных минеральных балансов (3 – Eu и 2 – Gd) с суммами учтенных долей масс этих элементов 82–101%.

**Европий.** В шононите с о-ва Стромболи, содержащем  $2.3 \cdot 10^{-4}$  % Eu, его максиминералы не обнаружены (Francalanci, 1989); в содержащем силлиманит плагиогнейсе из Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984) содержание Eu  $1.5 \cdot 10^{-4}$  %, максиминерал – титанит, в котором сконцентрировано 57% массы Eu; в мигматите из Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984) содержание Eu  $2.2 \cdot 10^{-4}$  %, максиминерал – ортит, в котором сконцентрировано 8% массы Eu.

**Гадолиний.** В мигматитах из Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984) содержание Gd 0.0018 и 0.0028%. В первом случае максиминералы не обнаружены, во втором найдены титанит и ортит, в которых сконцентрировано соответственно 67 и 17% массы Gd.

**Тербий.** Некоторый интерес представляет минеральный баланс Tb во включениях шпинелевых перидотитов из вулканических шлаков западной части Германии (Stosch, Seck, 1980), содержание Tb в них  $2.3 \cdot 10^{-6}$  %. Максиминералы не установлены. Минерал-концентратор – клинопироксен, в котором сконцентрировано 62% массы Tb. Сумма учтенных долей масс Tb в минералах 85% от его массы, установленной в отмеченных шлаках непосредственным анализом.

**Диспрозий.** Интересен результат изучения гранодиорита из батолита Восточный Пенинсуляр Ренджес (Gromet, Silver, 1983). В нем содержание Dy  $2.6 \cdot 10^{-4}$  %. Максиминералы: титанит – главный и ортит – второстепенный. В них находится почти вся масса Dy, но более точная оценка роли максиминералов затруднительна, поскольку сумма всех долей масс Dy в минеральном балансе 138 отн. %.

Приведенные эпизодические данные характеризуют преимущественно индивидуальные особенности изученных разностей горных пород.

### 11.3.5. Выводы

Среднее содержание в верхней части континентальной коры,  $n \cdot 10^{-4} \%$ : Eu – 1.3, Gd – 6.3, Tb – 0.89 и Dy – 4.8. Главные концентраторы всех четырех элементов сиениты, но роль сиенитов как носителей Eu, Gd, Tb и Dy очень мала. Больше половины масс всех четырех элементов сосредоточена в метаморфических породах,  $\%$ : Eu – 67.46, Gd – 70.93, Tb – 64.3 и Dy – 68.2.

Согласно полученным данным, в верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 1.87% масс Eu, в том числе монаците – 0.9, ортите – 0.7, бастнезите – 0.25, иттриалите – 0.01, фергусоните – 0.01%; 4.24% масс Gd, в том числе монаците – 2.48, ортите – 1.45, ксенотиме – 0.13, бастнезите – 0.1, иттриалите – 0.05, гадолините – 0.01, эвксените 0.01, фергусоните – 0.01%; 9.71 % масс Tb, в том числе ортите – 7.01, монаците – 2.34, ксенотиме – 0.21, иттриалите – 0.1, фергусоните – 0.02, гадолините – 0.02, эвксените – 0.01 %; 5.42% массы Dy, в том числе ортите – 4.5, монаците – 0.43, ксенотиме – 0.29, иттриалите – 0.14, фергусоните – 0.03, эвксените – 0.02, гадолините – 0.01%. Эти цифры, вероятно, являются минимально возможными. Роль максиминералов максимальная в гранитах и сиенитах.

## 11.4. ГОЛЬМИЙ, ЭРБИЙ, ИТТЕРБИЙ И ЛЮТЕЦИЙ

### 11.4.1. Среднее содержание и распределение масс Ho, Er, Yb и Lu в верхней части континентальной коры

Приведенные здесь средние содержания Ho, Er, Yb, Lu в горных породах (табл. 11.44) преимущественно соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2003б). Среднее содержание Ho в парагнейсах и парасланцах, а также среднее содержание Lu в песках и песчаниках заменены на предполагаемые более вероятные. Соответствующие этим данным значения среднего содержания рассматриваемых элементов в верхней части континентальной коры,  $n \cdot 10^{-4} \%$ : Ho – 1.3, Er – 2.7, Yb – 2.5, Lu – 0.48 несколько больше значений,  $n \cdot 10^{-4} \%$ : Ho – 0.62–0.83, Er – 2.3, Yb – 1.47–2.26, Lu –  $2.3 \cdot 10^{-5}$ – $3.5 \cdot 10^{-4}$ , опубликованных в последние 50 лет другими исследователями (Rudnick, Gao, 2004). В осадочных породах средние содержания Ho  $9.2 \cdot 10^{-5}$ , Er  $1.7 \cdot 10^{-4}$ , Lu  $3 \cdot 10^{-5} \%$  меньше тех, которые могли быть унаследованы при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава: Ho  $1.1 \cdot 10^{-4}$ , Er  $2.4 \cdot 10^{-4}$ , Lu  $4.3 \cdot 10^{-5} \%$  (расчет изоалюминиевым методом). Среднее содержание Yb в осадочных породах  $2 \cdot 10^{-4} \%$  практически соответствует тому, которое могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава –  $2.1 \cdot 10^{-4} \%$ . Главные концентраторы всех четырех элементов сиениты (табл. 11.44), но коэффициенты концентрации незначительные: Ho – 1.5, Er – 1.6, Yb – 1.75 и Lu – 2.5. Главные носители метаморфические породы гранитно-гнейсового слоя, в которых находится 68.19% масс Ho, 68 – Er, 61.1 – Yb и 59.2 – Lu.

Распределение Ho, Er, Yb, Lu в совокупности горных пород верхней части континентальной коры

| Горные породы                             | Масса пород, % | Среднее содержание, n·10 <sup>-4</sup> % |             |             |              | Доли масс, %  |              |               |               |
|-------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|-------------|-------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
|                                           |                | Ho                                       | Er          | Yb          | Lu           | Ho            | Er           | Yb            | Lu            |
| Пески и песчаники                         | 5.11           | 1.5                                      | 2.3         | 1.8         | 0.3*         | 5.9           | 4.39         | 5.74          | 3.21*         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4           | 0.9                                      | 1.9         | 2.5         | 0.39         | 7.2           | 7.37         | 10.57         | 8.48          |
| Карбонатные породы                        | 3.85           | 0.35                                     | 0.75        | 0.9         | 0.11         | 1.04          | 1.08         | 1.41          | 0.89          |
| Кремнистые породы                         | 0.33           | Не опр.                                  | Не опр.     | 2           | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.      | 0.27          | Не опр.       |
| Эвапориты                                 | 0.26           | Не опр.                                  | Не опр.     | Не опр.     | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.       |
| Кислые вулканы                            | 0.44           | 1.7                                      | 3.6         | 2.5         | 0.55         | 0.58          | 0.59         | 0.45          | 0.51          |
| Средние вулканы                           | 1.13           | 0.72?                                    | 2.1         | 2           | 0.32         | 0.63          | 0.89         | 0.92          | 0.76          |
| Основные вулканы                          | 2.11           | 1.3                                      | 2.6         | 2.3         | 0.46         | 2.11          | 2.05         | 1.97          | 2.03          |
| Граниты                                   | 8.21           | 1.3                                      | 3.1         | 4           | 0.9          | 8.21          | 9.5          | 13.35         | 15.46         |
| Гранодиориты                              | 3.38           | 1.9                                      | 3.8         | 3.6         | 1.1          | 4.94          | 4.79         | 4.95          | 7.78          |
| Базиты                                    | 1.5            | 0.99                                     | 2.2         | 2           | 0.5          | 1.14          | 1.23         | 1.22          | 1.57          |
| Сиениты                                   | 0.05           | 2                                        | 4.4         | 4.3         | 1.2          | 0.08          | 0.08         | 0.09          | 0.13          |
| Ультрабазиты                              | 0.05           | 0.16                                     | 0.35        | 0.48        | 0.07         | 0.01          | 0.01         | 0.01          | 0.01          |
| Метапесчаники                             | 2.92           | 1                                        | 2.7         | 1.6         | 0.26         | 2.25          | 2.94         | 1.9           | 1.59          |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56          | 1.7*                                     | 3.2         | 2.5         | 0.54         | 39.96         | 36.49        | 31.06         | 34.52         |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13           | 0.28                                     | 0.9         | 0.7         | 0.1          | 0.24          | 0.38         | 0.32          | 0.24          |
| Железистые породы                         | 0.38           | Не опр.                                  | Не опр.     | 4.5         | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.      | 0.7           | Не опр.       |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21          | 1.3                                      | 2.9         | 2.2         | 0.38         | 23.21         | 25.12        | 20.76         | 18.45         |
| Метариолиты                               | 0.66           | Не опр.                                  | Не опр.     | 3.8         | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.      | 1.02          | Не опр.       |
| Метаандезиты                              | 1.03           | Не опр.                                  | Не опр.     | 3.5         | 0.51         | Не опр.       | Не опр.      | 1.46          | 1.1           |
| Метабазиты                                | 3.29           | 1                                        | 2.5         | 2.9         | 0.48         | 2.53          | 3.07         | 3.88          | 3.3           |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>     | <b>1.3*</b>                              | <b>2.68</b> | <b>2.46</b> | <b>0.478</b> | <b>100.03</b> | <b>99.98</b> | <b>100.05</b> | <b>100.03</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95          | 0.92                                     | 1.72        | 1.97        | 0.3          | 14.14         | 12.84        | 15.99         | 12.58         |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68           | 1.16                                     | 3.57        | 2.23        | 0.43         | 3.32          | 3.53         | 3.34          | 3.3           |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b>23.63</b>   | <b>0.96*</b>                             | <b>1.86</b> | <b>2.01</b> | <b>0.321</b> | <b>17.46</b>  | <b>16.37</b> | <b>19.31</b>  | <b>15.88*</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19          | 1.42                                     | 3.17        | 3.66        | 0.904        | 14.38         | 15.61        | 19.62         | 24.95         |
| Параметаморфиты                           | 34.99          | 1.58*                                    | 3.05        | 2.39        | 0.497        | 42.45         | 39.81        | 33.98         | 36.35         |
| Ортометаморфиты                           | 28.19          | 1.19                                     | 2.68        | 2.37        | 0.387        | 25.74         | 28.19        | 27.12         | 22.85         |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой в целом</b>    | <b>76.37</b>   | <b>1.4*</b>                              | <b>2.9</b>  | <b>2.58</b> | <b>0.527</b> | <b>82.57</b>  | <b>83.61</b> | <b>80.72</b>  | <b>84.15</b>  |



#### 11.4.2. Доли масс Но и Ег, сконцентрированные в максиминералах

Граничные для максиминералов содержания (Григорьев, 1999) Но 0.02 и Ег 0.05%. Главный максиминерал элементов ортит, второй по значимости – ксенотим. Первоисточники материалов, использованных для расчетов средних содержаний максиминералов в горных породах, приведены в разделах предшествующих глав, в частности в разделе 6.2.2. По расчету, роль максиминералов как носителей Но и Ег существенна в гранитно-гнейсовом слое и верхней части континентальной коры в целом (табл. 11.45, 11.46). Из горных пород осадочного слоя изучены только пе-

Таблица 11.45

##### Роль максиминералов как носителей Но в верхней части континентальной коры

| Минералы     | Содержание Но в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Но, % | Содержание минералов, % | Доли масс Но, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Но, % |
| Бастнезит    | 0.02                         | Не опр.                 | Не опр.         | $4.2 \cdot 10^{-4}$     | 0.06            | $3.2 \cdot 10^{-4}$                | 0.05            |
| Ринколит     | 0.03                         | Не опр.                 | Не опр.         | $6.9 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $5.3 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Чевкинит     | 0.045                        | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Ортит        | 0.09                         | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.06            | 0.0063                  | 4.05            | 0.0048                             | 3.32            |
| Бломстрандин | 0.48                         | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $9 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Эвксенит     | 0.5                          | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.03            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.03            |
| Гадолинит    | 0.67                         | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.02            | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.02            |
| Иттриалит    | 0.79                         | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.12            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.1             |
| Фергусонит   | 1.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.03            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.02            |
| Ксенотим     | 2.9                          | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.3             | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 1.04            | $3.7 \cdot 10^{-5}$                | 0.89            |
| Сумма        |                              | $1.06 \cdot 10^{-4}$    | 0.36            | 0.0083                  | 5.35            | 0.0064                             | 4.43            |

Таблица 11.46

##### Роль максиминералов как носителей Ег в верхней части континентальной коры

| Минералы     | Содержание Ег в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Ег, % | Содержание минералов, % | Доли масс Ег, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Ег, % |
| Ринколит     | 0.06                         | Не опр.                 | Не опр.         | $6.9 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $5.3 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Ортит        | 0.21                         | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.07            | 0.0063                  | 4.55            | 0.0048                             | 3.73            |
| Гадолинит    | 0.66                         | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.01            |
| Эвксенит     | 1.7                          | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.05            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.04            |
| Бломстрандин | 1.9                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $9 \cdot 10^{-7}$                  | 0.01            |
| Иттриалит    | 3.1                          | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.22            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.18            |
| Ксенотим     | 3.4                          | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.18            | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.54            | $3.7 \cdot 10^{-5}$                | 0.47            |
| Чевкинит     | 4.5                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | 0.01            | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | 0.01            |
| Фергусонит   | 6.5                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.07            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.06            |
| Всего        |                              | $1.06 \cdot 10^{-4}$    | 0.25            | 0.0083                  | 5.55            | 0.0064                             | 4.51            |

Таблица 11.47

**Доли масс Но (%), сконцентрированные в максиминералах  
горных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы       |                            |                             |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые                     | Средние                    | В целом                     |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 1.59 (0.003)               | 0.13 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.3 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Ксенотим | 0.77 ( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.32 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.51 ( $3 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | 0.1 ( $3.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Всего    | 0.77 ( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.32 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )     | 2.1 (0.003)                | 0.13 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.4 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 11.48

**Доли масс Ег (%), сконцентрированные в максиминералах  
горных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы       |                           |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые                     | Средние                   | В целом                      |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 1.75 (0.003)               | 0.1 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.32 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Ксенотим | 0.59 ( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.2 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )      | 0.28 ( $3 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                   | 0.05 ( $3.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Всего    | 0.59 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.2 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )      | 2.03 (0.003)               | 0.1 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.37 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |

Таблица 11.49

**Доли масс Но (%), сконцентрированные в максиминералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                        | Гранодиориты                | Сиениты                      | Магматические породы в целом   |
|--------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Бастнезит    | 0.07 ( $4.7 \cdot 10^{-4}$ )   | Не опр.                     | Не опр.                      | 0.04 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Чевкинит     | < 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                     | 0.14 ( $6 \cdot 10^{-4}$ )   | < 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Ортит        | 5.54 (0.008)                   | 1.42 (0.003)                | 10.4 (0.023)                 | 3.73 (0.0058)                  |
| Бломстрандин | 0.03 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                     | 0.79 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.02 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Эвксенит     | 0.31 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                     | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.18 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     |
| Гадолинит    | 0.26 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                     | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.14 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )     |
| Иттриалит    | 1.22 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                     | Не опр.                      | 0.68 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Фергусонит   | 0.14 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.2 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.02 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.15 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Ксенотим     | 4.46 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | 0.05 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )  | 0.04 ( $2.7 \cdot 10^{-6}$ ) | 2.07 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Всего        | 12.03 (0.009)                  | 1.67 (0.003)                | 11.4 (0.024)                 | 7.01 (0.0064)                  |

ски, кислые и средние вулканиты. Роль максиминералов наиболее значительна в кислых вулканитах (табл. 11.47 и 11.48). В магматических породах гранитно-гнейсового слоя роль максиминералов максимальна в гранитах и сиенитах (табл. 11.49, 11.50), среди метаморфических пород – в гранито-гнейсах (табл. 11.51, 11.52).

Таблица 11.50

**Доли масс Ег (%), сконцентрированные в максиминералах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                      | Гранодиориты                 | Сиениты                        | Магматические породы в целом |
|--------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Ортит        | 5.41 (0.008)                 | 1.66 (0.003)                 | 10.97 (0.023)                  | 3.81 (0.0058)                |
| Гадолинит    | 0.11 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                      | $< 0.01$ ( $3 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.06 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Эвксенит     | 0.44 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                      | $< 0.01$ ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.27 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Бломстрандин | 0.05 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 1.43 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.04 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Иттриалит    | 2 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )      | Не опр.                      | Не опр.                        | 1.16 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Ксенотим     | 2.19 (0.0002)                | 0.03 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.02 ( $2.7 \cdot 10^{-6}$ )   | 1.38 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Чевкинит     | 0.02 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 6.14 (0.0006)                  | 0.05 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Фергусонит   | 0.31 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.55 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.06 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.37 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего        | 10.53 (0.0085)               | 2.24 (0.003)                 | 18.62 (0.024)                  | 7.14 (0.006)                 |

Таблица 11.51

**Доли масс Но (%), сконцентрированные в максиминералах метаморфических пород**

| Минералы  | Параметаморфические породы |              |               | Ортометаморфические породы   |                              |
|-----------|----------------------------|--------------|---------------|------------------------------|------------------------------|
|           | Метапесчаники              | Парасланцы   | В целом       | Гранито-гнейсы               | В целом                      |
| Бастнезит | Не опр.                    | Не опр.      | Не опр.       | 0.18 (0.0012)                | 0.17 (0.001)                 |
| Ортит     | 1.08 (0.0012)              | 4.24 (0.008) | 3.99 (0.0071) | 4.57 (0.0066)                | 4.2 (0.0056)                 |
| Ксенотим  | Не опр.                    | Не опр.      | Не опр.       | 1.78 ( $7.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 1.45 ( $6.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего     | 1.08 (0.0012)              | 4.24 (0.008) | 3.99 (0.0071) | 6.53 (0.0079)                | 5.82 (0.0067)                |

Таблица 11.52

**Доли масс Ег (%), сконцентрированные в максиминералах метаморфических пород**

| Минералы | Параметаморфические породы |              |               | Ортометаморфические породы   |             |                              |
|----------|----------------------------|--------------|---------------|------------------------------|-------------|------------------------------|
|          | Метапесчаники              | Парасланцы   | В целом       | Гранито-гнейсы               | Метариолиты | В целом                      |
| Ортит    | 0.93 (0.0012)              | 5.25 (0.008) | 4.97 (0.0071) | 4.78 (0.0066)                | 5.8 (0.008) | 4.36 (0.0056)                |
| Ксенотим | Не опр.                    | Не опр.      | Не опр.       | 0.88 ( $7.5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.     | 0.78 ( $6.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего    | 0.93 (0.0012)              | 5.25 (0.008) | 4.97 (0.0071) | 5.66 (0.0067)                | 5.8 (0.008) | 5.14 (0.0057)                |

### 11.4.3. Доли масс Yb и Lu, сконцентрированные в максиминералах

Граничные для максиминералов содержания (Григорьев, 1999) Yb 0.06 и Lu 0.01%. Согласно полученным данным, роль максиминералов как носителей Yb и Lu существенна в гранитно-гнейсовом слое и верхней части континентальной коры в целом (табл. 11.53, 11.54), причем роль ортита значительно больше суммарной роли остальных максиминералов. Из горных пород осадочного слоя изучены только пески, кислые и средние вулканисты.

Таблица 11.53

**Роль максиминералов как носителей Yb в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Yb в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Yb, % | Содержание минералов, % | Доли масс Yb, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Yb, % |
| Ринколит     | 0.09                         | Не опр.                 | Не опр.         | $6.9 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $5.3 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Ортит        | 0.3                          | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.9             | 0.0063                  | 7.26            | 0.0048                             | 5.74            |
| Гадолинит    | 0.6                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $4 \cdot 10^{-6}$                  | 0.01            |
| Чевкинит     | 0.67                         | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Бломстрандин | 2.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $9 \cdot 10^{-7}$                  | 0.01            |
| Эвксенит     | 2.3                          | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.08            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.06            |
| Ксенотим     | 2.3                          | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.12            | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.41            | $3.7 \cdot 10^{-5}$                | 0.34            |
| Иттриалит    | 4.06                         | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.33            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.26            |
| Фергусонит   | 5.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.06            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.05            |
| Сумма        |                              | $7 \cdot 10^{-5}$       | 0.21            | 0.0064                  | 8.16            | 0.0049                             | 6.47            |

Таблица 11.54

**Роль максиминералов как носителей Lu в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Lu в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Lu, % | Содержание минералов, % | Доли масс Lu, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Lu, % |
| Ортит        | 0.06                         | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.11            | 0.0063                  | 7.13            | 0.0048                             | 6               |
| Бломстрандин | 0.25                         | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $9 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Эвксенит     | 0.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.03            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.03            |
| Чевкинит     | 0.45                         | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Иттриалит    | 0.61                         | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.24            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.2             |
| Ксенотим     | 0.7                          | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.22            | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.66            | $3.7 \cdot 10^{-5}$                | 0.58            |
| Фергусонит   | 1.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.07            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.06            |
| Всего        |                              | $7 \cdot 10^{-5}$       | 0.33            | 0.0064                  | 8.15            | 0.0049                             | 6.87            |

Таблица 11.55

**Доли масс Yb (%), сконцентрированные в максиминералах горных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы        |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые                      | Средние                    | В целом                      |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 3.6 (0.003)                 | 0.15 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.54 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Ксенотим | 0.51 ( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.12 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.281 ( $3 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | 0.04 ( $3.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Всего    | 0.51 ( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.12 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )     | 3.88 (0.003)                | 0.15 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.58 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 11.56

**Доли масс Lu (%), сконцентрированные в максиминалах  
горных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы             |                                | Вулканогенные породы       |                            |                              |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
|          | Пески и песчаники            | В целом                        | Кислые                     | Средние                    | В целом                      |
| Ортит    | < 0.01 ( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | < 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 3.27 (0.003)               | 0.19 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.56 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Ксенотим | 0.93 ( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.23 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.38 ( $3 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | 0.07 ( $3.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Всего    | 0.93 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.23 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )     | 3.65 (0.003)               | 0.19 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.63 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   |

Таблица 11.57

**Доли масс Yb (%), сконцентрированные в максиминалах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                        | Гранодиориты                 | Сиениты                      | Магматические породы в целом |
|--------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Ортит        | 6 (0.008)                      | 2.5 (0.003)                  | 16.05 (0.023)                | 4.7 (0.0058)                 |
| Гадолинит    | 0.08 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                      | < 0.01 ( $3 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.05 ( $3 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Эвксенит     | 0.46 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                      | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.31 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Бломстрандин | 0.05 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                      | 1.69 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.04 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Иттриалит    | 2.03 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                      | Не опр.                      | 1.32 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Ксенотим     | 1.15 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | 0.02 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.01 ( $2.7 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.81 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Чевкинит     | < 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 0.93 ( $6 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.01 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Фергусонит   | 0.2 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )    | 0.46 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.05 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.25 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего        | 9.97 (0.0085)                  | 2.98 (0.003)                 | 18.73 (0.024)                | 7.49 (0.0064)                |

Таблица 11.58

**Доли масс Lu (%), сконцентрированные в максиминалах  
магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                      | Гранодиориты                 | Сиениты                      | Магматические породы в целом |
|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Ортит        | 5.33 (0.008)                 | 1.64 (0.003)                 | 11.5 (0.023)                 | 3.87 (0.0058)                |
| Бломстрандин | 0.02 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 0.69 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.02 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Эвксенит     | 0.18 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                      | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.11 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Чевкинит     | 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 2.25 (0.0006)                | 0.02 ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Иттриалит    | 1.36 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.81 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Ксенотим     | 1.56 (0.0002)                | 0.02 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.02 ( $2.7 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.78 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Фергусонит   | 0.2 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ )  | 0.35 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.04 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.24 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего        | 8.66 (0.013)                 | 2.01 (0.003)                 | 14.5 (0.024)                 | 5.85 (0.0061)                |

Таблица 11.59

**Доли масс Yb (%), сконцентрированные в максиминералах метаморфических пород**

| Минералы | Параметаморфические породы |                |                  | Ортометаморфические породы      |                |                                 |
|----------|----------------------------|----------------|------------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|
|          | Метапесчаники              | Парасланцы     | В целом          | Гранито-гнейсы                  | Метариолиты    | В целом                         |
| Ортит    | 2.25<br>(0.0012)           | 9.6<br>(0.008) | 8.86<br>(0.0071) | 8.99<br>(0.0066)                | 6.3<br>(0.008) | 6.9<br>(0.0056)                 |
| Ксенотим | Не опр.                    | Не опр.        | Не опр.          | 0.78<br>( $7.5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.        | 0.59<br>( $6.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего    | 2.25<br>(0.0012)           | 9.6<br>(0.008) | 8.86<br>(0.0071) | 9.77<br>(0.0067)                | 6.3<br>(0.008) | 7.49<br>(0.0057)                |

Таблица 11.60

**Доли масс Lu (%), сконцентрированные в максиминералах метаморфических пород**

| Минералы | Параметаморфические породы |              |               | Ортометаморфические породы   |                              |
|----------|----------------------------|--------------|---------------|------------------------------|------------------------------|
|          | Метапесчаники              | Парасланцы   | В целом       | Гранито-гнейсы               | В целом                      |
| Ортит    | 2.77 (0.0012)              | 8.89 (0.008) | 8.52 (0.0071) | 10.4 (0.0066)                | 8.62 (0.0056)                |
| Ксенотим | Не опр.                    | Не опр.      | Не опр.       | 1.47 ( $7.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 1.08 ( $6.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Всего    | 2.77 (0.0012)              | 8.89 (0.008) | 8.52 (0.0071) | 11.87 (0.0079)               | 9.7 (0.0067)                 |

Роль максиминералов наиболее значительна в кислых вулканитах (табл. 11.55, 11.56). В магматических породах гранитно-гнейсового слоя роль максиминералов максимальна в сиенитах (табл. 11.57, 11.58), на втором месте – граниты, среди метаморфических пород – гранито-гнейсы и парасланцы (табл. 11.59, 11.60).

#### 11.4.4. Обсуждение полученных данных

Литературные данные о содержании в горных породах Yb относительно многочисленны, поэтому сведения о среднем содержании Yb в горных породах пока могут считаться достаточно корректными. Литературных данных о содержании Ho, Er и Lu в горных породах значительно меньше, поэтому среднее содержание их в горных породах желательно уточнить.

Приведенные выше средние доли масс всех четырех элементов, сконцентрированные в максиминералах, надо рассматривать как минимально возможные по причинам, отмеченным в предшествующих разделах. Возможности сопоставления этой части данных с результатами изучения конкретных проб горных пород крайне ограничены. Относительно полных наборов данных о распределении Ho, Er и Lu в ассоциациях минералов, представляющих конкретные разности горных пород, мало, причем данные эти недостаточно точные. По расчету суммы долей масс Ho, Er и Lu, сконцентрированных в минералах изученных горных пород, составляют 26–148% от масс соответствующих содержаниям Ho, Er и Lu в исследованных горных породах. На первый взгляд, некоторое исключение представляет наиболее

изученный Yb. Литературных данных по Yb относительно много, но в большинстве случаев они неполны и недостаточно корректны. При количественных минералогических анализах его главные максиминералы, как правило, не учтены.

**Гольмий.** В теновом мигматите (проба АБ-7) из Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984) с содержанием Но  $7.6 \cdot 10^{-4} \%$  максиминерал – титанит, в котором сконцентрировано 59% масс Но. В остальных минералах-концентраторах (апатите, ортите, цирконе, магнетите, Fe-гастингсита) сконцентрировано еще 25% масс Но. Сумма минерального баланса 84%.

**Эрбий.** В гранодиорите из батолита Восточный Пенинсуляр Ренджес (Gromet, Silver, 1983) с содержанием Ер  $1.3 \cdot 10^{-4} \%$  максиминералы не обнаружены. Сумма минерального баланса 138 %, из них 137% приходится на минералы-концентраторы: роговую обманку, эпидот, титанит, апатит, ортит, циркон.

**Иттербий.** Из горных пород осадочного слоя наиболее изучены гиалориолит (С-39) из Забайкалья (Таусон и др., 1984) и шошонит (STR-56) с острова Стромболи (Francalanci, 1989). Содержание Yb здесь соответственно  $8.2 \cdot 10^{-4}$  и  $3.6 \cdot 10^{-4} \%$ , максиминералы не обнаружены, главные носители Yb стекло и основная масса. Из гранитоидов подробно изучен только гранодиорит из батолита Восточный Пенинсуляр Ренджес (Gromet, Silver, 1983), содержащий  $1.12 \cdot 10^{-4} \%$  Yb, максиминералы не обнаружены. Больше половины массы Yb сконцентрировано в титаните, сумма учтенных долей масс Yb 148%. Во включениях шпинелевых перидотитов из вулканических шлаков Западной Германии содержание Yb  $1.9 \cdot 10^{-5} \%$ , максиминералы не обнаружены. Половина масс Yb слабо сконцентрирована в клинопироксене (Stosch, Seck, 1980), сумма учтенных долей масс Yb 90%. Удовлетворительно изучены три пробы парасланцев из Сибири. Диопсид-скаполит-плагноклазовые сланцы 211-п и 191-п содержат  $3.4 \cdot 10^{-4} \%$  и  $4.4 \cdot 10^{-4} \%$  Yb (Петрова, Смирнова, 1982), максиминералы не обнаружены. В титаните слабо сконцентрировано 39 и 46% масс Yb, суммы учтенных долей масс Yb 95%. Плаггиогнейс АБ-162 содержит  $4.8 \cdot 10^{-4} \%$  Yb (Макрыгина, Смирнова, 1984), максиминералы не обнаружены. Почти весь Yb слабо сконцентрирован в гранате, апатите и ортите, сумма учтенных долей масс Yb 103%. Представляют интерес результаты изучения проб мигматитов из Сибири АБ-456 и АБ-7 (Макрыгина, Смирнова, 1984). Содержание Yb в них 0.0014 и 0.003%. Почти весь Yb сконцентрирован в максиминералах: титаните (74 и 70% масс Yb), цирконе и ортите, суммы учтенных долей масс Yb 108 и 88%. В ортоамфиболите АБ-244 из Сибири (Макрыгина, Смирнова, 1984) с содержанием Yb  $2.2 \cdot 10^{-4} \%$  максиминералы не обнаружены. Почти вся масса Yb слабо сконцентрирована в гастингситах, титаните, апатите. В гранулите из Северо-Западной Шотландии, содержащем  $3.3 \cdot 10^{-4} \%$  Yb, половина его массы слабо сконцентрирована в гранате, а остальная часть – преимущественно в клинопироксенах. Максиминералы не установлены (Budzinski, 1990).

**Лютеций.** Представляют интерес данные о шошоните (STR-56) с острова Стромболи (Francalanci, 1989) и о включениях шпинелевых перидотитов из вулканических шлаков Западной Германии (Stosch, Seck, 1980). Содержание Lu в них соответственно  $7.2 \cdot 10^{-5}$  и  $3.4 \cdot 10^{-6} \%$ , максиминералы не обнару-

жены. Суммы учтенных долей масс Lu 93 и 85%. В гранулите из Северо-Западной Шотландии, содержащем  $6.7 \cdot 10^{-5} \%$  Lu, около половины (54%) его масс слабо сконцентрировано в гранате. Остальная часть – преимущественно в пироксенах, максиминералы не обнаружены (Budzinski, 1990).

Таким образом, приведенные разрозненные данные отражают преимущественно индивидуальные особенности изученных разностей горных пород.

#### 11.4.5. Выводы

Среднее содержание в верхней части континентальной коры No  $1.3 \cdot 10^{-4} \%$ , Eг  $2.7 \cdot 10^{-4}$ , Yb  $2.5 \cdot 10^{-4}$ , Lu  $4.8 \cdot 10^{-5}$ . Главные концентраторы этих элементов сиениты, главные носители метаморфические породы гранитно-гнейсового слоя, %: 68.19 No, 68 Eг, 61.1 Yb и 59.2 Lu.

В максиминералах сконцентрировано 4.43% масс No, в том числе ортите – 3.32, ксенотиме – 0.89, иттриалите – 0.1, бастнезите – 0.05, эвксените – 0.03, фергусоните – 0.02, гадолините – 0.02%; 4.51% масс Eг, в том числе ортите – 3.73, ксенотиме – 0.47, иттриалите – 0.18, фергусоните – 0.06, эвксените 0.04, гадолините – 0.01, блонстрандине – 0.01, чевкините – 0.01%. Эти цифры минимально возможные. Роль максиминералов максимальна в гранитах и сиенитах. В максиминералах сконцентрировано 6.47% масс Yb, в том числе ортите – 5.74, ксенотиме – 0.34, иттриалите – 0.26, эвксените – 0.06, фергусоните – 0.05, гадолините – 0.01, блонстрандине – 0.01%; 6.87% масс Lu, в том числе ортите – 6, ксенотиме – 0.58, иттриалите – 0.2, фергусоните – 0.06, в эвксените – 0.03%. Эти цифры минимально возможные.

#### 11.5. ТОРИЙ И УРАН

##### 11.5.1. Среднее содержание и распределение масс Th и U в верхней части континентальной коры

Приводимые значения средних содержаний Th и U в горных породах (табл. 11.61) частично соответствуют опубликованным ранее (Григорьев, 2003б). Часть значений скорректирована с учетом не учтенных ранее преимущественно новых публикаций (Глухан, Серых, 2001; Кременецкий и др., 1990; Маслов и др., 2008; Мизенс и др., 2006; Condie et al., 1991; Font et al., 2006; Huber et al., 2001; Gotze et al., 1998; Osae et al., 2006; Yang et al., 1998). По новым данным, средние содержания в верхней части континентальной коры,  $n \cdot 10^{-4} \%$ : Th 9.1, U 2.5, находятся в пределах значений, опубликованных другими исследователями:  $n \cdot 10^{-4} \%$ : Th 8.6–10.8, U 1.5–2.8 (Rudnick, Gao, 2004). В осадочных породах среднее содержание Th  $9.9 \cdot 10^{-4} \%$  и U  $3.2 \cdot 10^{-4} \%$  больше того, которое могло быть заимствовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава: Th  $7.5 \cdot 10^{-4} \%$  и U  $1.9 \cdot 10^{-4} \%$  (расчет изоалюминиевым методом). Таким образом, оба элемента в осадочных породах избыточные.



Таблица 11.61

**Распределение масс Th и U в ассоциации горных пород  
верхней части континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород, % | Среднее содержание, 10 <sup>-4</sup> % |             | Доли масс, % |             |
|-------------------------------------------|----------------|----------------------------------------|-------------|--------------|-------------|
|                                           |                | Th                                     | U           | Th           | U           |
| Пески и песчаники                         | 5.11           | 6.7                                    | 2           | 3.7          | 4.1         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4           | 14                                     | 4.3         | 15.9         | 17.8        |
| Карбонатные породы                        | 3.85           | 4.3                                    | 2.2         | 1.8          | 3.4         |
| Кремнистые породы                         | 0.33           | 3.2                                    | 2.4         | 0.1          | 0.3         |
| Эвапориты                                 | 0.26           | 0.7                                    | 0.68        | < 0.1        | 0.1         |
| Кислые вулканы                            | 0.44           | 13                                     | 4.5         | 0.6          | 0.8         |
| Средние вулканы                           | 1.13           | 4.1                                    | 1.1         | 0.5          | 0.5         |
| Основные вулканы                          | 2.11           | 2.7                                    | 0.86        | 0.6          | 0.7         |
| Граниты                                   | 8.21           | 18                                     | 3.9         | 16.2         | 12.8        |
| Гранодиориты                              | 3.38           | 9.9                                    | 2.7         | 3.7          | 3.6         |
| Базиты                                    | 1.5            | 3.2                                    | 0.8         | 0.5          | 0.5         |
| Сиениты                                   | 0.05           | 13                                     | 3           | 0.1          | < 0.1       |
| Ультрабазиты                              | 0.05           | 0.004                                  | 0.001       | < 0.1        | < 0.1       |
| Метапесчаники                             | 2.92           | 7.3                                    | 1.7         | 2.3          | 2           |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56          | 9.2                                    | 2.3         | 30.8         | 28          |
| Метаморфизованные карбонатные породы      | 1.13           | 1.7                                    | 0.7         | 0.2          | 0.3         |
| Железистые породы                         | 0.38           | Не опр.                                | Не опр.     | Не опр.      | Не опр.     |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21          | 8                                      | 2.4         | 20.3         | 22.2        |
| Метариолиты                               | 0.66           | 9.5                                    | 4*          | 0.7          | 1.1         |
| Метаандезиты                              | 1.03           | 6*                                     | 1*          | 0.7          | 0.4         |
| Метабазиты                                | 3.29           | 3.9                                    | 0.9         | 1.2          | 1.2         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>     | <b>9.1</b>                             | <b>2.51</b> | <b>99.9</b>  | <b>99.8</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95          | 9.9                                    | 3.2         | 21.5         | 25.7        |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68           | 4.4                                    | 1.4         | 1.7          | 2           |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b>23.63</b>   | <b>9</b>                               | <b>2.9</b>  | <b>23.2</b>  | <b>27.7</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19          | 14                                     | 3.2         | 20.5         | 16.9        |
| Параметаморфические породы                | 34.99          | 8.7                                    | 2.2         | 33.3         | 30.3        |
| Ортометаморфические породы                | 28.19          | 7.4                                    | 2.2         | 22.9         | 24.9        |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой в целом</b>    | <b>76.37</b>   | <b>9.2</b>                             | <b>2.4</b>  | <b>76.7</b>  | <b>72.1</b> |

\* Значения, предполагаемые при недостаточном количестве исходных данных.

Главные концентраторы Th и U глинистые породы, кислые вулканы и граниты (см. табл. 11.61), но средние коэффициенты концентрации этих элементов здесь минимальные – 1.4–2. Главные носители Th – метаморфические породы, в которых содержится 56.2% его масс. Главные носители U осадочные породы и продукты их метаморфизма, содержащие 56% его масс.

### 11.5.2. Роль максиминералов в минеральном балансе Th и U в горных породах

Повышенное содержание Th и U характерно для гидроксилсодержащих цепочечных и листовых силикатов Fe и Mg, высокое – для редкоземельных, ниобиевых, танталовых, циркониевых, титановых, урановых, ториевых и некоторых других акцессорных минералов. В чужих минералах часть масс Th и U концентрируется в микровключениях. Часть их масс в чужих минералах связана относительно слабо. Собственные минералы Th и U являются их максиминералами всегда, а некоторые чужие – часто или редко. Так, монацит является ториевым максиминералом часто, а циркон урановым – иногда. В масштабах верхней части континентальной коры к максиминералам отнесены минералы-концентраторы, где среднее содержание равно или больше минимального для максиминералов  $Th \geq 0.3\%$ ,  $U \geq 0.1$  (Григорьев, 1999).

Для определения средней роли максиминералов как носителей Th и U использованы опубликованные результаты количественных минералогических анализов горных пород. Среднее содержание минералов в горных породах рассчитано по результатам более чем 2370 количественных минералогических анализов: пески и песчаники > 764, гранодиориты (включая другие гранитоиды повышенной основности) 485, сиениты (включая щелочные граниты) 461, граниты > 407, парагнейсы > 58, метапесчаники > 47, гранито-гнейсы > 47. Остальные горные породы изучены слабо (количество анализов не известно или < 50). Ниже перечислены главные источники данных.

*Пески, песчаники.* Терригенные породы Русской платформы от четвертичных до нижнерифейских (Ронов и др., 1963; Челышев и др., 1965; Ильин, Сыромятина, 1972; Кузнецов, 1992; Сергеева, 1989); аркозовые песчаники Приверхоанского прогиба (Справочное..., 1958).

*Глины и сланцы.* Суглинки района КМА от эоценовых до девонских (Кузнецов и др., 1972).

*Вулканы осадочного слоя.* Кавказские липариты, андезиты, базальты и порфириды: липарит-дацитовые андезитовые, долеритовые, диабазовые (Ляхович, Чирвинская, 1961; Ляхович, 1963; Држбашян, 1965; Мнацаканян, 1965).

*Граниты и гранодиориты.* Гранитоиды Южно-Калифорнийского батолита (Ларсен и др., 1956); гранитоиды СССР (Таусон, 1961; Леонова, 1962; Леонова, Ренне, 1964; Геохимия варисских..., 1966; Ляхович, 1967; Бартисян, 1968; Вигорова, Покровский, 1973; Бушляков, Соболев, 1976; Ипатьева, 1976; Бельков, 1979; Чашухина и др., 1989).

*Сиениты СССР* ( Леонова, Погиблова, 1961; Еськова и др., 1964; Поляков, Кот, 1965; Туровский, Кокарев, 1968; Фишман и др., 1968; Батиева, Бельков, 1984, 1985; Бельков и др., 1988).

*Метапесчаники.* Докембрийские метапесчаники, конгломераты, кварциты Приполярного Урала (Фишман и др., 1966; Вигорова, Покровский, 1973), Тувы (Ляхович, 1966).

*Парагнейсы.* Рифейские парасланцы Рудных гор (Ермолаев и др., 1976); докембрийские парасланцы Приполярного Урала (Вигорова, Покровский,

Таблица 11.62

## Роль максиминералов как носителей Th в верхней части континентальной коры

| Минералы     | Содержание Th в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Th, % | Содержание минералов, % | Доли масс Th, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Th, % |
| Циртолит     | 0.3                          | $1.6 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $2 \cdot 10^{-6}$       | < 0.01          | $1.9 \cdot 10^{-6}$                | < 0.01          |
| Лопарит      | 0.57                         | Не опр.                 | Не опр.         | $1.3 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $1 \cdot 10^{-6}$                  | < 0.01          |
| Ортит        | 1.1                          | $6 \cdot 10^{-5}$       | 0.07            | 0.0063                  | 7.53            | 0.0048                             | 5.8             |
| Пироклор     | 1.1                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.3 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $1 \cdot 10^{-6}$                  | < 0.01          |
| Чевкинит     | 1.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $5.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $4.2 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Эвксинит     | 1.9                          | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.02            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.01            |
| Ксенотим     | 2.9                          | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.03            | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.15            | $3.7 \cdot 10^{-5}$                | 0.12            |
| Уранинит     | 3.2                          | $9.3 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.03            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.02            |
| Фергусонит   | 3.4                          | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.01            |
| Бломстрандин | 3.8                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $9 \cdot 10^{-7}$                  | < 0.01          |
| Монацит      | 5.8                          | $4.6 \cdot 10^{-5}$     | 0.3             | 0.0016                  | 10.09           | 0.0013                             | 8.29            |
| Иттриалит    | 8                            | Не опр.                 | Не опр.         | $2.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.18            | $1.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.14            |
| Торит        | 49.2                         | $4.3 \cdot 10^{-5}$     | 2.35            | $6.1 \cdot 10^{-5}$     | 3.26            | $5.7 \cdot 10^{-5}$                | 3.08            |
| U-торит      | 52.4                         | Не опр.                 | Не опр.         | $1.1 \cdot 10^{-7}$     | 0.01            | $8.6 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01          |
| Торианит     | 62.1                         | Не опр.                 | Не опр.         | $4.5 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01          | $3.4 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01          |
| Всего        |                              |                         | 2.75            |                         | 21.28           |                                    | 17.47           |

1973); метаосадочные сланцы и парагнейсы Балтийского щита, Тувы, Урала (Ляхович, 1966; Вулканизм..., 1987); докембрийские кристаллические сланцы Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Гранито-гнейсы* уральские, юго-восточной Тувы (Ляхович, 1966, 1967), Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984), Украинского щита (Носырев и др., 1986), Кольского полуострова (Ляхович, 1966; Бельков и др., 1988).

*Метариолиты.* Метаморфизованные кварцевые порфиры, кварцевые амфиболиты и метадациты Приполярного Урала (Фишман и др., 1966, 1968).

*Метаандезиты.* Часть докембрийских амфиболитов Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Метабазиты.* Аподиабазовые и апогнейсовые мигматиты Криворожской зоны (Трощенко, 1975).

При расчетах все разновидности торита кроме U-торита учтены вместе. Среднее содержание Th и U в минералах определено приблизительно по литературным данным.

*Торий.* Установлено, что в верхней части континентальной коры в ториевых максиминералах сконцентрировано 17.47% масс Th (табл. 11.62). В осадочном слое доля масс Th, сконцентрированная в максиминералах, почти в 6 раз меньше, чем в гранитно-гнейсовом. В осадочных породах (табл. 11.63) главная роль принадлежит ториту и монациту. В кислых вулканитах осадочного слоя главный ториевый максиминерал монацит (см. табл. 11.63). В гранитно-гнейсовом слое роль ториевых максиминералов

Таблица 11.63

**Доли масс Th (%), сконцентрированные в ториевых максиминералах  
горных пород осадочного слоя**

| Минералы | Осадочные породы                |                              |                                   | Вулканогенные породы          |                  |                                 |
|----------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------|
|          | Пески и<br>песчаники            | Глины и<br>сланцы            | В целом                           | Кислые                        | Средние          | В целом                         |
| Циртолит | Не опр.                         | Не опр.                      | Не опр.                           | 0.02<br>(0.0001)              | Не опр.          | 0.01<br>(1·10 <sup>-5</sup> )   |
| Ортит    | < 0.01<br>(7·10 <sup>-8</sup> ) | Не опр.                      | < 0.01<br>(1.8·10 <sup>-8</sup> ) | 2.54<br>(0.003)               | 0.27<br>(0.0001) | 1 (0.0004)                      |
| Ксенотим | 0.17<br>(4·10 <sup>-5</sup> )   | Не опр.                      | 0.03<br>(1·10 <sup>-5</sup> )     | 0.07<br>(3·10 <sup>-5</sup> ) | Не опр.          | 0.02<br>(3.6·10 <sup>-6</sup> ) |
| Уранинит | Не опр.                         | Не опр.                      | Не опр.                           | 0.12<br>(5·10 <sup>-5</sup> ) | Не опр.          | 0.04<br>(6·10 <sup>-6</sup> )   |
| Монацит  | 1.1<br>(1.3·10 <sup>-4</sup> )  | Не опр.                      | 0.19<br>(3.3·10 <sup>-5</sup> )   | 4.46<br>(0.001)               | Не опр.          | 1.58<br>(1.2·10 <sup>-4</sup> ) |
| Торит    | 1 (1.4·10 <sup>-5</sup> )       | 3.2<br>(9·10 <sup>-5</sup> ) | 2.48<br>(5·10 <sup>-5</sup> )     | 1.89<br>(5·10 <sup>-5</sup> ) | Не опр.          | 0.67<br>(6·10 <sup>-6</sup> )   |
| Сумма    | 2.27                            | 3.2                          | 2.7                               | 9.1                           | 0.27             | 3.32                            |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 11.64

**Доли масс Th (%), сконцентрированные в ториевых  
максиминералах магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                        | Гранодиориты                 | Сиениты                      | Магматические<br>породы в целом |
|--------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Циртолит     | < 0.01 (1.5·10 <sup>-6</sup> ) | < 0.01 (1·10 <sup>-6</sup> ) | 0.21 (0.0009)                | < 0.01 (4.6·10 <sup>-6</sup> )  |
| Лопарит      | < 0.01 (1.8·10 <sup>-6</sup> ) | < 0.01 (6·10 <sup>-7</sup> ) | 0.75 (0.0017)                | < 0.01 (7.7·10 <sup>-6</sup> )  |
| Ортит        | 4.89 (0.008)                   | 3.33 (0.003)                 | 19.46 (0.023)                | 4.56 (0.0058)                   |
| Пирохлор     | < 0.01 (5·10 <sup>-6</sup> )   | < 0.01 (2·10 <sup>-6</sup> ) | 0.08 (1·10 <sup>-4</sup> )   | < 0.01 (4·10 <sup>-6</sup> )    |
| Чевкинит     | < 0.01 (1.5·10 <sup>-6</sup> ) | Не опр.                      | 0.55 (0.0006)                | < 0.01 (3.2·10 <sup>-6</sup> )  |
| Эвксинит     | 0.08 (8·10 <sup>-5</sup> )     | Не опр.                      | < 0.01 (8·10 <sup>-8</sup> ) | 0.07 (5·10 <sup>-5</sup> )      |
| Ксенотим     | 0.32 (0.0002)                  | 0.01 (3·10 <sup>-6</sup> )   | 0.01 (2.7·10 <sup>-6</sup> ) | 0.27 (1.3·10 <sup>-4</sup> )    |
| Уранинит     | 0.14 (7.8·10 <sup>-5</sup> )   | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.11 (4.9·10 <sup>-5</sup> )    |
| Фергусонит   | 0.03 (1.5·10 <sup>-5</sup> )   | 0.11 (3.2·10 <sup>-5</sup> ) | 0.01 (3.8·10 <sup>-6</sup> ) | 0.04 (1.8·10 <sup>-5</sup> )    |
| Бломстрандин | 0.02 (8.7·10 <sup>-6</sup> )   | Не опр.                      | 0.96 (3.3·10 <sup>-4</sup> ) | 0.02 (6.7·10 <sup>-6</sup> )    |
| Монацит      | 13.86 (0.0043)                 | 2.34 (0.0004)                | 10.71 (0.0024)               | 11.6(0.0028)                    |
| Иттриалит    | 0.89 (0.0002)                  | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.69 (1.2·10 <sup>-4</sup> )    |
| Торит        | 3.83 (1.4·10 <sup>-4</sup> )   | 19.88 (0.0004)               | 26.49 (0.0007)               | 6.68 (1.9·10 <sup>-4</sup> )    |
| U-торит      | 0.01(5·10 <sup>-7</sup> )      | 0.05 (1·10 <sup>-6</sup> )   | 0.92 (2.3·10 <sup>-5</sup> ) | 0.02 (6.5·10 <sup>-7</sup> )    |
| Торианит     | Не опр.                        | Не опр.                      | 3.25 (6.8·10 <sup>-5</sup> ) | 0.01 (2.6·10 <sup>-7</sup> )    |
| Всего        | 24.06                          | 25.72                        | 63.4                         | 24.06                           |

Таблица 11.65

**Доли масс Th (%), сконцентрированные в ториевых максиминералах  
метаморфических пород**

| Минералы | Параметаморфические породы      |                                 |                                 | Ортометаморфические породы      |                               |                                 |                                   |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
|          | Метапес-<br>чаники              | Пара-<br>сланцы                 | В целом                         | Гранито-<br>гнейсы              | Метарио-<br>литы              | Метаба-<br>зиты                 | В целом                           |
| Циртолит | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                         | < 0.01<br>( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                       | < 0.01<br>( $7 \cdot 10^{-7}$ ) | < 0.01<br>( $3.4 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Ортит    | 1.81<br>(0.0012)                | 9.57<br>(0.008)                 | 8.98<br>(0.0071)                | 9.07<br>(0.0066)                | 9.26<br>(0.008)               | Не опр.                         | 8.32<br>(0.0056)                  |
| Пироклор | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                         | < 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                       | Не опр.                         | < 0.01<br>( $1.6 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Ксенотим | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                         | 0.27<br>( $7.5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                       | Не опр.                         | 0.24<br>( $6.2 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Уранинит | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                         | < 0.01<br>( $6 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                       | Не опр.                         | < 0.01<br>( $5 \cdot 10^{-7}$ )   |
| Монацит  | 2.38<br>(0.0003)                | 5.67<br>(0.0009)                | 5.33<br>(0.0008)                | 19.57<br>(0.0027)               | 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | < 0.01<br>( $4 \cdot 10^{-8}$ ) | 17.24<br>(0.0022)                 |
| Торит    | 1.68<br>( $2.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 1.87<br>( $3.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 1.87<br>( $3.3 \cdot 10^{-5}$ ) | 2.71<br>( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                       | 37.85<br>(0.0003)               | 2.39<br>( $3.6 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Всего    | 5.87                            | 17.11                           | 16.18                           | 31.62                           | 9.27                          | 37.85                           | 28.19                             |

Таблица 11.66

**Роль урановых максиминералов как носителей U в верхней части континентальной коры**

| Минералы      | Содержание<br>U в мине-<br>ралах, % | Осадочный слой             |                   | Гранитно-гнейсовый слой    |                   | Верхняя часть континен-<br>тальной коры |                   |
|---------------|-------------------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------------------------|-------------------|
|               |                                     | Содержание<br>минералов, % | Доли масс<br>U, % | Содержание<br>минералов, % | Доли масс<br>U, % | Содержание<br>минералов, %              | Доли масс<br>U, % |
| Ортит         | 0.11                                | $6 \cdot 10^{-5}$          | 0.02              | 0.0063                     | 2.89              | 0.0048                                  | 2.11              |
| Монацит       | 0.27                                | $4.6 \cdot 10^{-5}$        | 0.04              | 0.0016                     | 1.8               | 0.0013                                  | 1.4               |
| Торит         | 0.37                                | $4.3 \cdot 10^{-5}$        | 0.05              | $6.1 \cdot 10^{-5}$        | 0.09              | $5.7 \cdot 10^{-5}$                     | 0.08              |
| Циртолит      | 1.5                                 | $1.6 \cdot 10^{-6}$        | 0.01              | $2 \cdot 10^{-6}$          | 0.01              | $1.9 \cdot 10^{-6}$                     | 0.01              |
| Иттриалит     | 1.7                                 | Не опр.                    | Не опр.           | $2.1 \cdot 10^{-5}$        | 0.15              | $1.6 \cdot 10^{-5}$                     | 0.11              |
| Фергусонит    | 2.2                                 | Не опр.                    | Не опр.           | $3.1 \cdot 10^{-6}$        | 0.03              | $2.4 \cdot 10^{-6}$                     | 0.02              |
| Бломстрандин  | 2.8                                 | Не опр.                    | Не опр.           | $1.2 \cdot 10^{-6}$        | 0.01              | $9 \cdot 10^{-7}$                       | 0.01              |
| Торианит      | 4                                   | Не опр.                    | Не опр.           | $4.5 \cdot 10^{-8}$        | < 0.01            | $3.4 \cdot 10^{-8}$                     | < 0.01            |
| Эвксенит      | 5.8                                 | Не опр.                    | Не опр.           | $8.6 \cdot 10^{-6}$        | 0.21              | $6.6 \cdot 10^{-6}$                     | 0.15              |
| U-торит       | 7.3                                 | Не опр.                    | Не опр.           | $1 \cdot 10^{-7}$          | < 0.01            | $8.6 \cdot 10^{-8}$                     | < 0.01            |
| Метаторбернит | 53.8                                | Не опр.                    | Не опр.           | $9.7 \cdot 10^{-9}$        | < 0.01            | $7.4 \cdot 10^{-9}$                     | < 0.01            |
| Уранинит      | 69.5                                | $9.3 \cdot 10^{-7}$        | 0.22              | $8.6 \cdot 10^{-6}$        | 2.49              | $6.6 \cdot 10^{-6}$                     | 1.83              |
| Сумма         |                                     |                            | 0.34              |                            | 7.68              |                                         | 5.72              |

Таблица 11.67

**Доли масс U (%), сконцентрированные в урановых максиминералах  
в горных породах осадочного слоя континентальной коры**

| Минералы | Осадочные породы                |                               |                                   | Вулканогенные породы          |                    |                                 |
|----------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|
|          | Пески и<br>песчаники            | Глины и<br>сланцы             | В целом                           | Кислые                        | Средние            | В целом                         |
| Ортит    | < 0.01<br>( $7 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.                       | < 0.01<br>( $1.8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.73<br>(0.003)               | 0.1<br>(0.0001)    | 0.32<br>(0.0004)                |
| Торит    | 0.03<br>( $1.4 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.08<br>( $9 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.06<br>( $5 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.04<br>( $5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.<br>Не опр. | 0.02<br>( $6 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Монацит  | 2 (0.0015)                      | Не опр.                       | 0.32<br>( $3.8 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.6<br>(0.001)                | Не опр.            | 0.24<br>( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Циртолит | Не опр.                         | Не опр.                       | Не опр.                           | 0.33<br>(0.0001)              | Не опр.            | 0.11<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Уранинит | Не опр.                         | Не опр.                       | Не опр.                           | 7.72<br>( $5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.            | 3.02<br>( $6 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Сумма    | 2.03                            | 0.08                          | 0.38                              | 9.42                          | 0.1                | 3.71                            |

Таблица 11.68

**Доли масс U (%), сконцентрированные в урановых максиминералах  
в магматических породах гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы      | Граниты                      | Гранодиориты                 | Сиениты                      | В целом                        |
|---------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Ортит         | 2.26 (0.008)                 | 1.22 (0.003)                 | 8.43 (0.023)                 | 1.99 (0.0058)                  |
| Монацит       | 2.98 (0.0043)                | 0.4 (0.0004)                 | 2.16 (0.0024)                | 2.36 (0.0028)                  |
| Торит         | 0.13 ( $1.4 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.55 (0.0004)                | 0.86 (0.0007)                | 0.22 ( $1.9 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Циртолит      | 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.01 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )   | 4.5 (0.0009)                 | 0.02 ( $4.6 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Иттриалит     | 0.87 (0.0002)                | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.64 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Фергусонит    | 0.08 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.26 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.03 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.12 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Бломстрандин  | 0.06 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 3.08 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.06 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Торианит      | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.91 ( $6.8 \cdot 10^{-5}$ ) | < 0.01 ( $2.6 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Эвксенит      | 1.19 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                      | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.91 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )     |
| U-торит       | 0.01 ( $5 \cdot 10^{-7}$ )   | 0.03 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.56 ( $2.3 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.01 ( $6.5 \cdot 10^{-7}$ )   |
| Метаторбернит | 0.01 ( $9 \cdot 10^{-8}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.01 ( $5.6 \cdot 10^{-8}$ )   |
| Уранинит      | 13.9 ( $7.8 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                      | Не опр.                      | 10.64 ( $4.9 \cdot 10^{-5}$ )  |
| Сумма         | 21.5                         | 2.47                         | 20.53                        | 16.97                          |

повышенная. В гранитах и гранодиоритах (включая другие гранитиды повышенной основности) в ториевых максиминералах сконцентрировано около 1/4 массы Th (11.64). В гранито-гнейсах и метабазах по расчету на максиминералы приходится около 1/3 части Th, а в сиенитах – почти 2/3 (табл. 11.65). Главные максиминералы в гранитах, метапесчаниках, гранито-гнейсах монацит и ортит, в гранодиоритах, сиенитах – торит и ортит, в парасланцах – ортит и монацит, метабазах – торит.

*Уран.* В урановых максиминералах в верхней части континентальной коры сконцентрировано 5.72% массы U, в том числе в ортите – 2.11, урани-

**Доли масс U (%), сконцентрированные в урановых максиминералах  
в метаморфических породах**

| Минералы | Параметаморфические породы      |                                 |                                 | Ортометаморфические породы    |                                 |                                 |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|          | Метапесча-<br>ники              | Парасланцы                      | В целом                         | Гранито-<br>гнейсы            | Метариолиты                     | В целом                         |
| Ортит    | 0.78<br>(0.0012)                | 3.83<br>(0.008)                 | 3.6<br>(0.0071)                 | 3.03<br>(0.0066)              | Не опр.                         | 2.96<br>(0.0056)                |
| Монацит  | 0.48<br>(0.0003)                | 1.06<br>(0.0009)                | 1 (0.0008)                      | 3.04<br>(0.0027)              | < 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 2.86<br>(0.0022)                |
| Торит    | 0.05<br>( $2.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.06<br>( $3.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.06<br>( $3.3 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.06<br>( $4 \cdot 10^{-5}$ ) | 1.23<br>(0.0003)                | 0.06<br>( $3.6 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Циртолит | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                         | 0.03<br>( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.01<br>( $7 \cdot 10^{-7}$ )   | 0.02<br>( $3.4 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Уранинит | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                         | 0.17<br>( $6 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                         | 0.17<br>( $5 \cdot 10^{-7}$ )   |
| Сумма    | 1.31                            | 4.95                            | 4.66                            | 6.33                          | 1.24                            | 6.07                            |

ните – 1.83, монаците – 1.4 (табл. 11.66). Согласно имеющимся данным, в осадочном слое доля массы U, сконцентрированная в максиминералах, в десятки раз меньше, чем в гранитно-гнейсовом. Особенно мала она в глинистых породах (табл. 11.67). В осадочном слое максимальной ролью максиминералов характеризуются кислые вулканиты. Согласно имеющимся данным, главный максиминерал здесь уранинит (табл. 11.67). В гранитно-гнейсовом слое роль максиминералов в целом повышенная, особенно в гранитах и сиенитах (табл. 11.68). Главные максиминералы в гранитах уранинит, в гранодиоритах и в сиенитах – ортит. В метаморфических породах роль максиминералов в целом близка к средней для верхней части континентальной коры, главные из них ортит и монацит (табл. 11.69).

### 11.5.3. Обсуждение полученных данных

Литературные данные о содержании в горных породах Th и U относительно многочисленны, поэтому приведенные величины средних содержаний Th и U в горных породах пока могут считаться достаточно корректными. Сведения о содержании ториевых и урановых максиминералов в горных породах неполны. Так, автору не известны данные о содержании максиминералов Th и U в карбонатных и кремнистых породах, эвапоритах, основных вулканитах, ультрабазитах, метаандезитах. Но это второстепенные носители Th и U (см. табл. 11.61). Вероятно, более существенно отсутствие данных о содержании экзогенных ториевых и урановых минералов в наиболее распространенных осадочных породах.

Возможности сопоставления приводимых здесь средних долей масс Th и U, сконцентрированных в горных породах, с результатами изучения конкретных проб горных пород малы. При определении роли акцессорных ми-

нералов как носителей редких элементов в конкретных пробах горных пород погрешности могут быть соизмеримы с определяемыми величинами (Григорьев, 1999). Надежны только результаты расчетов минеральных балансов, а таких данных мало. Отметим наиболее корректные.

В гранитах, плагиогранитах и тоналитах Средней Азии с повышенным содержанием Th – 0.0014–0.0057% в максиминералах (ортит, торит, U-торит) сконцентрировано 22–75% его масс (Гаврилин и др., 1966; Леонова, 1962; Леонова, Ренне, 1964). В гранитах, содержащих 0.031–0.045% Th, в максиминералах (циртолит, Fe-торит, торит, колумбит, пирохлор) находится 56.6–78.9% его масс (Солодов и др., 1987). В нефелиновых сиенитах Ловозерского массива с околосредним содержанием Th (0.00076–0.0033%) максиминерал лопарит, в котором сконцентрировано 0–34% масс Th (Поляков, Кот, 1965). В сиенитах и граносиенитах Северного Тянь-Шаня с повышенным содержанием Th (0.0049–0.006%) в максиминералах (торит, U-торит, ортит, торианит) сконцентрировано 9–70% масс Th (Геохимия варисских..., 1966). В гранитах Южной Калифорнии (Ларсен и др., 1956), района озера Онтарио (Tilton et al., 1955), Средней Азии (Таусон, 1961; Леонова, Погиблова, 1961; Геохимия варисских..., 1966) и Казахстана (Леонова, Ренне, 1964) урановые максиминералы торит, U-торит, монацит, ксенотим, ортит, циркон. При содержании U в гранитах меньше среднего (0.0001–0.00028%) в максиминералах сконцентрировано 0–39% его масс. При повышенном содержании U (0.00042–0.0006%) эти доли 4–49%. В.Н. Павловой (Солодов и др., 1987) изучены граниты с содержанием U 0.0069–0.0095%. Здесь в максиминералах (циртолите, колумбите, пирохлоре и ближе не определенных) находится 72.6–75.7% масс U.

В сиенитах Горной Шории (Журавлев, Осипов, 1965) и ийолитах Заангарского щелочного массива (Жмодик, 1964) с малым содержанием U (0.00006–0.0002%) его максиминералы не установлены. В сиенитах и граносиенитах Средней Азии (Леонова, Погиблова, 1961; Геохимия варисских..., 1966) с содержанием U 0.0005–0.001% в максиминералах (торианите, U-торите, иногда цирконе) сконцентрировано 0–19% U.

Отмеченные выше литературные данные немногочисленны. Они характеризуют индивидуальные особенности изученных массивов интрузивных пород. Однако при сопоставлении суммарных долей масс Th и U сконцентрированных во всех имеющихся максиминералах, прослеживается главная закономерность. Это прямая зависимость сконцентрированных в максиминералах долей масс Th и U от валового содержания этих элементов в горных породах (Григорьев, 1999). С учетом отмеченной зависимости видно, что приведенные литературные данные в целом не противоречат нашим средним оценкам роли максиминералов как носителей Th и U в горных породах, исключение – данные по Th в сиенитах. Возможно, средняя оценка роли ториевых максиминералов как носителей Th в сиенитах преувеличена. В большинстве же случаев есть основания предполагать некоторое преуменьшение средней роли максиминералов как носителей Th и U. Главная причина заключается в том, что при количественных минералогических анализах, как правило, не учитывают частицы акцессорных минералов < 10–50 мкм.



#### 11.5.4. Выводы

В верхней части континентальной коры среднее содержание: Th  $9.3 \cdot 10^{-4} \%$ , U  $2.5 \cdot 10^{-4} \%$ . Главные концентраторы Th и U глинистые породы, кислые вулканы, граниты и сиениты. В осадочных породах среднее содержание Th  $9.9 \cdot 10^{-4} \%$  и U  $3.2 \cdot 10^{-4} \%$ . Главные носители Th и U метаморфические породы. В них сконцентрировано 56.2% масс Th и 55.2% масс U.

В верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 17.47% масс Th, в том числе монаците – 8.29, ортите – 5.8, торите – 3.08, иттриалите – 0.14, уранините – 0.02, ксенотиме – 0.12, фергусоните – 0.01, эвксените – 0.01; 5.72% масс U, в том числе ортите – 2.11, уранините – 1.83, монаците – 1.4, эвксените – 0.15, иттриалите – 0.11, фергусоните – 0.02, торите – 0.08, циртолите – 0.01, блонстрандине – 0.01.

#### 12.1. ТИТАН

##### 12.1.1. Среднее содержание и распределение масс Ti в верхней части континентальной коры

Среднее содержание Ti в горных породах сначала было принято по А.Б. Ронову с соавторами (1990). В табл. 12.1 некоторые из цифр уточнены с учетом результатов анализов, опубликованных в последние годы многими авторами в статьях петрографической и литологической ориентации. Среднее содержание Ti в верхней части континентальной коры, соответствующее исправленным данным, 0.393%. Оно близко к 0.32–0.4% – цифрам, опубликованным другими авторами в последние 50 лет (Rudnick, Gao, 2004). Максимальным средним содержанием характеризуются основные магматические породы и продукты их метаморфизма (средние КК 1.68–1.93), минимальным – карбонатные породы (средние КК 0.12–0.16). Главные носители массы Ti метаморфические породы (67.25%). Судя по расчету изоалюминиевым методом, распределение Ti в верхней части континентальной коры почти соответствует геохимическому балансу. Его среднее содержание в осадочных породах (0.35%) несколько больше того, которое могло быть унаследовано от гранитно-гнейсового слоя современного состава (0.32% согласно расчету изоалюминиевым методом), но разница не выходит за рамки возможных погрешностей.

##### 12.1.2. Средний минеральный баланс Ti в верхней части континентальной коры

Средний минеральный баланс Ti в верхней части континентальной коры определен приближенно. Главная причина – большие вариации содержания Ti в породообразующих минералах. Это затрудняет корректное определение его среднего содержания в главных минералах-носителях. Установлено, что в минералого-геохимическом отношении Ti типичный малый химический элемент. Интервал нехарактерной концентрации большой. Он включает минералы со средним содержанием Ti от 3 до 24% (средние КК от 7.6 до 61). Интервал нехарактерной концентрации разграничивает нетитановые и титановые минералы (табл. 12.2). Первые являются миниминералами (средние КК < 1) и кларкминералами (средние КК 1–61), вторые – максиминералами (средние КК > 61). По расчету, в миниминералах находится всего

Таблица 12.1

**Среднее содержание и распределение масс Ti, Zr и Hf по горным породам  
в верхней части континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород, отн. % | Среднее содержание, $n \cdot 10^{-4} \%$ |            |            | Доли масс, % |              |             |
|-------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------|------------|------------|--------------|--------------|-------------|
|                                           |                     | Ti                                       | Zr         | Hf         | Ti           | Zr           | Hf          |
| Пески и песчаники                         | 5.11                | 3500                                     | 230        | 4.5        | 4.55         | 7.3          | 5.1         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4                | 4700                                     | 190        | 5          | 12.44        | 12.4         | 11.6        |
| Карбонатные породы                        | 3.85                | 610                                      | 51         | 0.61       | 0.6          | 1.2          | 0.5         |
| Кремнистые породы                         | 0.33                | 1700                                     | 19         | 1.5        | 0.14         | < 0.1        | 0.11        |
| Эвапориты                                 | 0.26                | Не опр.                                  | 33         | Не опр.    | Не опр.      | 0.1          | Не опр.     |
| Кислые вулканы                            | 0.44                | 1600                                     | 110        | 4.1        | 0.18         | 0.3          | 0.4         |
| Средние вулканы                           | 1.13                | 4600                                     | 110        | 3.6        | 1.32         | 0.8          | 0.9         |
| Основные вулканы                          | 2.11                | 7100                                     | 110        | 3.7        | 3.81         | 1.4          | 1.7         |
| Граниты                                   | 8.21                | 1800                                     | 180        | 3.9        | 3.76         | 9.2          | 7.1         |
| Гранодиориты                              | 3.38                | 3800                                     | 140        | 2.5        | 3.27         | 3            | 1.9         |
| Базиты                                    | 1.5                 | 6600                                     | 130        | 2.6        | 2.52         | 1.2          | 0.9         |
| Сиениты                                   | 0.05                | 4000                                     | 500        | 11         | 0.05         | 0.2          | 0.1         |
| Ультрабазиты                              | 0.05                | 3600                                     | 43         | 0.46       | 0.05         | < 0.1        | < 0.1       |
| Метапесчаники                             | 2.92                | 2900                                     | 170        | 4.7        | 2.16         | 3.1          | 3.1         |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56               | 4800                                     | 150        | 5.5        | 37.33        | 28.6         | 37.4        |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13                | 480                                      | 32         | Не опр.    | 0.14         | 0.2          | Не опр.     |
| Железистые породы                         | 0.38                | 1800                                     | 30         | Не опр.    | 0.17         | 0.1          | Не опр.     |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21               | 3300                                     | 190        | 5.1        | 19.49        | 27.6         | 26.3        |
| Метариолиты                               | 0.66                | 2300                                     | 170        | 7.6        | 0.39         | 0.7          | 1.1         |
| Метаандезиты                              | 1.03                | 4600                                     | 160        | Не опр.    | 1.21         | 1            | Не опр.     |
| Метабазиты                                | 3.29                | 7600                                     | 110        | 2.3        | 6.36         | 2.3          | 1.7         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>          | <b>3930</b>                              | <b>160</b> | <b>4.5</b> | <b>99.94</b> | <b>100.8</b> | <b>99.8</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95               | 3500                                     | 169        | 3.9        | 17.73        | 21           | 17.3        |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68                | 5670                                     | 110        | 3.7        | 5.31         | 2.5          | 3           |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b>23.63</b>        | <b>3830</b>                              | <b>159</b> | <b>3.9</b> | <b>23.04</b> | <b>23.5</b>  | <b>20.3</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19               | 2870                                     | 164        | 3.4        | 9.65         | 13.6         | 10          |
| Параметаморфические породы                | 34.99               | 4470                                     | 147        | 5.2        | 39.8         | 32.1         | 40.4        |
| Ортометаморфические породы                | 28.19               | 3830                                     | 179        | 4.6        | 27.45        | 31.6         | 29.1        |
| Гранитно-гнейсовый слой в целом           | 76.37               | 3960                                     | 162        | 4.7        | 76.9         | 77.3         | 79.5        |

Таблица 12.2

## Средний минеральный баланс Ti в верхней части континентальной коры

| Категории минералов<br>как концентраторов Ti | Минералы-<br>носители Ti | Содержание<br>минералов-<br>носителей, % | Содержание Ti,<br>% | Доли масс Ti,<br>% |
|----------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|---------------------|--------------------|
| Миниминералы<br>КК 0.03–1                    | Кварц                    | 23.98                                    | 0.005               | 0.31               |
|                                              | Полевые шпаты            | 38.09                                    | 0.01–0.03           | 1.23               |
|                                              | Монтмориллонит           | 0.43                                     | 0.12                | 0.13               |
|                                              | Гиперстен                | 0.43                                     | 0.13                | 0.14               |
|                                              | Рипидолит                | 1.91                                     | 0.13                | 0.63               |
|                                              | Клинохлор                | 0.69                                     | 0.14                | 0.25               |
|                                              | Актинолит                | 0.39                                     | 0.14                | 0.14               |
|                                              | Куммингтонит             | 0.46                                     | 0.14                | 0.16               |
|                                              | Диопсид                  | 0.48                                     | 0.21                | 0.26               |
|                                              | Альмандин                | 0.85                                     | 0.21                | 0.45               |
|                                              | Каолинит                 | 0.26                                     | 0.26                | 0.17               |
|                                              | Магнетит                 | 0.66                                     | 0.31                | 0.52               |
|                                              | Прочие                   |                                          |                     | 1.17               |
|                                              | Всего                    |                                          |                     | 5.56               |
| Кларкминералы<br>КК 12.03–5.35               | Мусковит                 | 1.99                                     | 0.35                | 1.77               |
|                                              | Гидромусковит            | 2.51                                     | 0.35                | 2.25               |
|                                              | Ставролит                | 0.25                                     | 0.42                | 0.27               |
|                                              | Опал                     | 1.3                                      | 0.5                 | 1.67               |
|                                              | Эгирин                   | 0.09                                     | 0.52                | 0.12               |
|                                              | Авгит                    | 1.21                                     | 0.56                | 1.72               |
|                                              | Роговая обманка          | 3.16                                     | 0.56                | 4.5                |
|                                              | Рибекит                  | 0.17                                     | 0.62                | 0.27               |
|                                              | Гастингсит               | 0.31                                     | 0.75                | 0.59               |
|                                              | Везувиян                 | 0.027                                    | 1                   | 0.07               |
|                                              | Биотит                   | 7.49                                     | 1.55                | 29.5               |
|                                              | Кроссит                  | 0.051                                    | 1.82                | 0.24               |
|                                              | Гидробиотит              | 0.48                                     | 2.6                 | 3.2                |
|                                              | Прочие                   |                                          |                     | 0.2                |
|                                              | Всего                    |                                          |                     | 46.3               |
| ИНК КК 5.35–71.2                             | Андрадит                 | 0.0012                                   | 7.78                | 0.02               |
|                                              | Ti-магнетит              | 0.066                                    | 11.7                | 1.96               |
|                                              | Всего                    |                                          |                     | 1.98               |
| Максиминералы<br>КК 71.2–17.4                | Титанит                  | 0.18                                     | 24.2                | 11.1               |
|                                              | Лейкоксен                | 0.015                                    | 24.2                | 0.92               |
|                                              | Ильменит                 | 0.19                                     | 29.3                | 14.2               |
|                                              | Рутил                    | 0.011                                    | 59.3                | 1.62               |
|                                              | Анатаз                   | 0.0018                                   | 59.3                | 0.27               |
|                                              | Всего                    |                                          |                     | 28.11              |
| Сумма                                        |                          |                                          |                     | 81.95              |

**Роль титановых минералов как носителей Ti в слоях  
верхней части континентальной коры**

| Минералы    | Содержание Ti<br>в минералах, % | Осадочный слой             |                    | Гранитно-гнейсовый слой    |                    |
|-------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
|             |                                 | Содержание<br>минералов, % | Доли масс<br>Ti, % | Содержание<br>минералов, % | Доли масс<br>Ti, % |
| Ti-магнетит | 11.7                            | 0.15                       | 4.58               | 0.04                       | 1.18               |
| Титанит     | 24.2                            | 0.029                      | 1.83               | 0.23                       | 14.06              |
| Лейкоксен   | 24.2                            | 0.04                       | 2.53               | 0.0077                     | 0.47               |
| Ильменит    | 29.3                            | 0.15                       | 11.48              | 0.2                        | 14.8               |
| Рутил       | 59.3                            | 0.024                      | 3.62               | 0.0064                     | 0.93               |
| Анализ      | 59.3                            | 0.0053                     | 0.82               | $7.2 \cdot 10^{-4}$        | 0.11               |
| Брукит      | 59.3                            | $7 \cdot 10^{-5}$          | 0.01               | $6.6 \cdot 10^{-7}$        | < 0.01             |
| Сумма       |                                 | 0.398                      | 24.87              | 0.485                      | 31.55              |

5.56% массы Ti. Почти половина его масс слабо сконцентрирована в кларк-минералах, в основном в листовых и цепочечных силикатах. Главным кларкминерал биотит, роль которого больше суммарной роли всех остальных кларкминералов. По расчету, в минералах интервала нехарактерной концентрации сосредоточено 1.98% масс Ti. Эта величина сильно преувеличена за счет преуменьшения доли Ti, сконцентрированной в титановых минералах. Она почти полностью обеспечена Ti-магнетитом, но в литературе Ti-магнетитом (титаномагнетитом) чаще всего называют магнетит с микровростками ильменита и других титановых минералов. С учетом этого, а также ввиду промышленной ценности Ti-магнетита, он в дальнейшем условно включен в число титановых минералов. В этом случае доля масс Ti, сконцентрированная в титановых минералах, составляет 30.07%. Дефицит минерального баланса почти 18%. В этой цифре суммированы все погрешности определений среднего химического и минерального состава горных пород, но особенно среднего содержания Ti в породообразующих силикатах. В верхней части континентальной коры главный титановый минерал – ильменит. Его роль как носителя Ti соизмерима с суммарной ролью остальных титановых минералов. На втором месте титанит. В осадочном и гранитно-гнейсовом слоях (табл. 12.3) ситуация близка.

### 12.1.3. Средние доли масс титана, сконцентрированные в титановых минералах горных пород

Средние содержания титановых минералов в горных породах рассчитаны по опубликованным результатам количественных минералогических анализов более чем 2480 проб горных пород. Наиболее важные источники исходных данных отмечены в разделе 12.2.2. Установлено, что в песчаных и слабо изученных кремнистых породах наиболее важный носитель Ti ильменит, на втором месте рутил. В глинистых породах соотношение роли этих минералов обратное (табл. 12.4). В недостаточно изученных карбо-

Таблица 12.4

**Доли масс Ti, сконцентрированные в собственных минералах в осадочных породах, %**

| Минералы  | Пески и песчаники          | Глины и сланцы               | Карбонатные породы | Кремнистые породы | Осадочные породы           |
|-----------|----------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------|----------------------------|
| Титанит   | 3.46 (0.05)                | 1.65 (0.032)                 | 7.93 (0.02)        | 2.28 (0.016)      | 2.35 (0.034)               |
| Лейкоксен | 10.37 (0.15)               | 0.82 (0.016)                 | Не опр.            | Не опр.           | 3.25 (0.047)               |
| Ильменит  | 16.74 (0.2)                | 3.12 (0.05)                  | Не опр.            | 22.41 (0.13)      | 6.7 (0.08)                 |
| Рутил     | 6.59 (0.04)                | 3.68 (0.03)                  | 3.78 (0.004)       | 20.36 (0.06)      | 4.62 (0.028)               |
| Анатаз    | 4.07 (0.024)               | 0.04 ( $3 \cdot 10^{-4}$ )   | Не опр.            | Не опр.           | 1.07 (0.0063)              |
| Брукит    | 0.04 ( $3 \cdot 10^{-4}$ ) | < 0.01 ( $6 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.            | Не опр.           | 0.01 ( $8 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Сумма     | 41.27 (0.46)               | 9.31 (0.13)                  | 11.71 (0.024)      | 45.05 (0.21)      | 18 (0.2)                   |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках среднее содержание минералов, %.

Таблица 12.5

**Доли масс Ti, сконцентрированные в собственных минералах в вулканогенных породах осадочного слоя, %**

| Минералы    | Кислые                     | Средние                      | Основные                     | Все вулканыты                  |
|-------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Ti-магнетит | 1.46 (0.02)                | 12.72 (0.5)                  | 23.07 (1.4)                  | 19.81 (0.96)                   |
| Титанит     | 0.15 (0.001)               | 0.03 ( $5 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.01 ( $4 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.02 ( $5 \cdot 10^{-4}$ )     |
| Лейкоксен   | 0.3 (0.002)                | 0.32 (0.006)                 | 0.03 (0.001)                 | 0.12 (0.0027)                  |
| Ильменит    | 5.49 (0.03)                | 31.21 (0.49)                 | 28.89 (0.7)                  | 28.94 (0.56)                   |
| Рутил       | 0.29 ( $8 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.03 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.02 ( $2.4 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Анатаз      | 0.04 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | < 0.01 ( $5 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.                      | < 0.01 ( $1.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Сумма       | 7.73 (0.054)               | 44.31 (1)                    | 52.01 (2.1)                  | 48.91 (1.52)                   |

натных породах, по имеющимся данным, наиболее важен титанит, а второе место в качестве носителя Ti принадлежит рутилу. В вулканогенных породах наиболее важен ильменит, а второе место в качестве носителя Ti принадлежит Ti-магнетиту (табл. 12.5). По имеющимся данным, в средних и основных вулканитах роль титановых минералов повышенная, а в кислых – минимальная. В гранитно-гнейсовом слое очень высокой ролью титановых минералов характеризуются магматические породы (табл. 12.6), а также метапесчаники (табл. 12.7) и продукты метаморфизма вулканогенных пород (табл. 12.8). Во всех случаях главные максиминералы ильменит и титанит.

Возможности сопоставления полученных данных с минеральными балансами титана в конкретных пробах горных пород ограничены. Литературные данные эпизодические. Их обобщение опубликовано (Григорьев, 1999), поэтому лишь кратко их прокомментируем. Корректные определения минеральных балансов Ti в конкретных осадочных и вулканогенных породах автору не известны. К осадочным породам относительно близки по минеральному составу изученные коры выветривания Светлинского золоторудного месторождения. В изученных пробах валовое содержание Ti 0.66–1.17%. В рутиле, титаните, ильмените сконцентрировано от нуля до 38% массы Ti. Есть тенденция прямой зависимости доли масс Ti, сконцент-

Таблица 12.6

**Доли масс Ti (%), сконцентрированные в главных собственных минералах  
в магматических породах гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы     | Граниты                           | Гранодиориты                      | Базиты                          | Сиениты                           | Ультрабазиты                  | Магматические породы в целом      |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Тi-магнетит  | 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                           | 35.46 (2)                       | 0.38<br>(0.013)                   | 9.75<br>(0.3)                 | 9.38<br>(0.23)                    |
| Эвксенит     | 0.01<br>( $8 \cdot 10^{-5}$ )     | Не опр.                           | Не опр.                         | < 0.01<br>( $8 \cdot 10^{-8}$ )   | Не опр.                       | < 0.01<br>( $5 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Мурманит     | Не опр.                           | Не опр.                           | Не опр.                         | 1.45<br>(0.033)                   | Не опр.                       | 0.01<br>( $1.3 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Лопарит      | < 0.01<br>( $1.8 \cdot 10^{-6}$ ) | < 0.01<br>( $6 \cdot 10^{-7}$ )   | Не опр.                         | 0.1<br>(0.0017)                   | Не опр.                       | < 0.01<br>( $7.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Титанит      | 16.13<br>(0.12)                   | 12.74<br>(0.2)                    | 9.9<br>(0.27)                   | 35.09<br>(0.58)                   | 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-4}$ ) | 13.49<br>(0.16)                   |
| Лейкоксен    | 0.21<br>(0.0016)                  | 0.04<br>( $6 \cdot 10^{-4}$ )     | < 0.01<br>( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.02<br>( $4 \cdot 10^{-4}$ )     | Не опр.                       | 0.1<br>(0.0012)                   |
| Ильменит     | 39.07<br>(0.24)                   | 38.55<br>(0.5)                    | 22.2<br>(0.5)                   | 29.3<br>(0.4)                     | 48.83<br>(0.6)                | 39.82<br>(0.39)                   |
| Ильменорутил | 0.07<br>( $3 \cdot 10^{-4}$ )     | < 0.01<br>( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                         | Не опр.                           | Не опр.                       | 0.03<br>( $1.9 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Рутил        | 0.16<br>( $5 \cdot 10^{-4}$ )     | 0.24<br>(0.0016)                  | 2.36<br>(0.027)                 | < 0.01<br>( $1.3 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.06<br>( $4 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.76<br>(0.0038)                  |
| Анатаз       | 0.16<br>( $5 \cdot 10^{-4}$ )     | 0.05<br>( $3.4 \cdot 10^{-4}$ )   | Не опр.                         | < 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                       | 0.08<br>( $4 \cdot 10^{-4}$ )     |
| Всего        | 55.82<br>(0.36)                   | 51.62<br>(0.7)                    | 69.92<br>(2.8)                  | 66.34<br>(1.03)                   | 58.65<br>(0.9)                | 63.67<br>(0.79)                   |

Таблица 12.7

**Доли масс Ti (%), сконцентрированные в собственных минералах  
в параметаморфических породах**

| Минералы | Металесчаники | Парасланцы    | Метакарбонатные породы | Параметаморфиты |
|----------|---------------|---------------|------------------------|-----------------|
| Титанит  | 25.03 (0.3)   | 15.13 (0.3)   | 2.52 (0.005)           | 15.7 (0.29)     |
| Ильменит | 22.23 (0.22)  | 9.16 (0.15)   | Не опр.                | 9.83 (0.15)     |
| Рутил    | 8.36 (0.042)  | 0.82 (0.0068) | Не опр.                | 1.21 (0.0094)   |
| Анатаз   | Не опр.       | 0.19 (0.0015) | Не опр.                | 0.17 (0.0013)   |
| Всего    | 55.62 (0.56)  | 25.3 (0.46)   | 2.52 (0.005)           | 26.91 (0.45)    |

рированной в этих минералах, от его валового содержания и обратной – от суммарного содержания слюд и гидрослюд в породе. Эти результаты близки к тем, которые получены расчетом для осадочных пород в целом. В гранитоидах Верхисетского массива распределение Ti по минералам зависит в основном от его валового содержания, но даже при валовом содержании меньшем, чем кларковое, роль титанита и ильменита в качестве носителей Ti значительна (Бушляков, Соболев, 1976). При содержании Ti, близком к кларковому, в этих минералах сконцентрировано 35–60% его масс. Эти дан-

**Доли масс Ti (%), сконцентрированные в собственных минералах  
в ортометамофических породах**

| Минералы  | Гранито-гнейсы               | Метариолиты               | Метаандезиты | Метабазиты   | Ортометаморфиты              |
|-----------|------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|------------------------------|
| Титанит   | 11 (0.15)                    | 17.89 (0.17)              | 28.94 (0.55) | 12.74 (0.4)  | 12 (0.19)                    |
| Лейкоксен | 0.01 ( $1.5 \cdot 10^{-4}$ ) | 10.52 (0.1)               | 8.95 (0.17)  | 3.18 (0.1)   | 1.26 (0.02)                  |
| Перовскит | 0.01 ( $1.2 \cdot 10^{-4}$ ) | Не опр.                   | Не опр.      | Не опр.      | 0.01 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )   |
| Ильменит  | 13.32 (0.15)                 | 29.3 (0.23)               | 25.48 (0.4)  | 17.35 (0.45) | 14.99 (0.2)                  |
| Рутил     | 0.01 ( $4.8 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.1 ( $4 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.88 (0.007) | 2.28 (0.03)  | 0.57 (0.0038)                |
| Анатаз    | 0.04 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )   | Не опр.                   | Не опр.      | Не опр.      | 0.02 ( $1.6 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Всего     | 24.39 (0.3)                  | 57.81 (0.5)               | 64.25 (1.13) | 35.55 (0.98) | 28.85 (0.41)                 |

ные соответствуют приведенным выше результатам расчетов, выполненных для гранитоидов в целом. Минеральные балансы Ti в ультрабазитах не вполне корректны. Главный недостаток большинства – отсутствие количественного учета включений ильменита в магнетите. В перидотитах Малого Кавказа содержание Ti в несколько раз меньше кларкового. Титановые минералы не установлены. В рудных пироксенитах Качканарского массива на Среднем Урале важнейшим квазиконцентратором и квазиносителем Ti является магнетит с включениями ильменита. Роль относительно крупных частиц ильменита второстепенная. Есть прямая зависимость роли такого магнетита от валового содержания Ti в породе. В литературе есть несколько минеральных балансов Ti в метагabbро из Восточных Саян и Урала. Валовое содержание Ti здесь несколько больше кларкового. Из титановых минералов учтен только ильменит, причем его содержание преуменьшено. Не учтены включения в магнетите. Роль ильменита прямо зависит от валового содержания Ti. Она соответствует той, которая рассчитана для метабазитов в целом. Представляют интерес также минеральные балансы Ti в скарнах и рудах турьинских месторождений на Северном Урале. Здесь его содержание меньше кларкового. Титановые минералы не обнаружены.

#### 12.1.4. Обсуждение полученных данных

Новое значение среднего содержания Ti в верхней части континентальной коры близко к публиковавшимся в последние 50 лет. Это косвенное подтверждение того, что приводимые данные о среднем содержании Ti в горных породах пока могут считаться достаточно корректными, но не исключено, что новые данные о среднем содержании Ti в некоторых метаморфических породах несколько преувеличены. Если это так, то доли масс Ti, сконцентрированные в титановых минералах, здесь несколько преуменьшены. Так ли это, покажет будущее. Но есть и более существенные основания считать доли масс Ti, сконцентрированные в титаните, рутиле и анатазе, минимально возможными. Это преуменьшение содержания акцессорных минералов при количественных минералогических анализах (Григорьев, 1999). Полученные данные – очередное приближение к пониманию



ситуации в верхней части континентальной коры. Они нуждаются в уточнении и детализации, но для этого нужны более подробная модель верхней части континентальной коры и дополнительные данные о вариациях содержания титановых минералов в континентальных горных породах.

#### **12.1.5. Выводы**

Среднее содержание Ti в верхней части континентальной коры 0.393%. Наибольшим средним содержанием Ti характеризуются основные магматические породы и продукты их метаморфизма. Главные носители Ti метаморфические породы, в которых находится 67.25% массы Ti.

В верхней части континентальной коры в титановых минералах сконцентрировано 30.07% масс Ti, в том числе ильмените – 14.2, титаните – 11.1, Ti-магнетите – 1.96, рутиле – 1.62, лейкоксене – 0.92, анатазе – 0.27. Определенные доли масс Ti, сконцентрированные в титановых минералах, минимально возможные.

### **12.2. ЦИРКОНИЙ И ГАФНИЙ**

#### **12.2.1. Среднее содержание и распределение масс Zr и Hf в верхней части континентальной коры**

Среднее содержание Zr и Hf в горных породах (табл. 12.1) соответствует опубликованному раньше (Григорьев, 2003б), среднее содержание в верхней части континентальной коры Zr 0.016% и Hf –  $4.5 \cdot 10^{-4}$  %. Эти цифры близки к тем, которые были получены другими авторами в последние годы: Zr – 0.016–0.237% и Hf –  $4.3 \cdot 10^{-4}$ – $5.8 \cdot 10^{-4}$  % (Rudnick, Gao, 2004). Среднее содержание Zr и Hf в совокупности континентальных осадочных пород (Zr – 0.0169% и Hf –  $3.9 \cdot 10^{-4}$  %) близко к тому, которое, по расчету, могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава: Zr – 0.013, Hf –  $3.8 \cdot 10^{-4}$  % (расчет изоалюминиевым методом). Главные концентраторы Zr и Hf сиениты, но роль их как носителей этих элементов ничтожна (см. табл. 12.1). Главные носители Zr и Hf метаморфические породы гранитно-гнейсового слоя (63.6 и 69.5% массы соответственно).

#### **12.2.2. Доли масс Zr и Hf, сконцентрированные в максиминералах**

Главный максиминерал как Zr, так и Hf – циркон. Данные, позволяющие определить роль циркона как носителя Zr и Hf, представляют три направления исследований. Первое – косвенное определение вероятной роли циркона исходя из содержаний Zr в породообразующих минералах. Х. Дегенхардт (1959) показал, что в полевых шпатах, кварце, мусковите, кальците, доломите, флюорите, гипсе содержание Zr преимущественно меньше его кларкового содержания в земной коре. В пироксенах, амфиболах, биотите, каолините, галлуазите, монтмориллоните, иллите, глауконите и в некоторых

рудных минералах оно преимущественно соизмеримо с кларковым или больше последнего. Поэтому Х. Дегенхардт утверждал, что в горных породах, содержащих мало темноцветных и глинистых минералов, главный носитель циркон Zr. В.В. Ляхович (1968) пришел к заключению, что в породообразующих минералах может быть сосредоточено до половины той массы Zr, которая имеется в гранитоидах. Последнее обобщение имеющихся данных выполнил В.В. Иванов (1997). Он подтвердил отмеченные закономерности и показал, что они распространяются на Hf.

Второе направление – определение роли циркона исходя из его среднего содержания в наиболее изученных массивах горных пород. Отметим наиболее значительные и достоверные данные. По А.Б. Ронову с коллегами (1963), среднее содержание циркона в песках Русской платформы 0.011%. Этой цифре соответствует доля масс Zr, сконцентрированная в цирконе – 22%. Согласно расчету по данным В.В. Ляховича (1967), среднее содержание циркона в гранитах СССР 0.011–0.019%, соответственно, доля массы циркония, сконцентрированная в цирконе, 30–51%. На основе этих и других подобных данных автор приблизительно определил среднее содержание циркона в верхней части земной коры – 0.024% (Григорьев, 1999б). Оно соответствует доле массы Zr, сконцентрированной в цирконе, – 70%. К сожалению, эти цифры оказались преувеличенными.

Третье направление наиболее корректное, но трудоемкое. Это определение минеральных балансов Zr в конкретных горных породах. Первые два баланса (один неполный) рассчитал Х. Дегенхардт (1959). В трахидолеритовом базальте из Браккенберга 13% масс Zr рассеяно в полевых шпатах, 46 – в пироксене и оливине, 42 – сконцентрировано в титаномагнетите. Циркон не обнаружен. В вюрмбергском граните 22% масс Zr рассеяно в кварце и полевых шпатах и 30% сконцентрировано в биотите, содержащем микровключения циркона. Х. Дегенхардт предполагал, что остальные 48% масс Zr сконцентрированы в свободных частицах циркона. И.Н. Егоровым с коллегами (1966) изучены кварцево-микроклиновые граниты и сиениты Улканского массива. Здесь в цирконе сконцентрировано от 82 до 96% масс Zr. Близкие данные получены В.А. Чашухиной (1991) для некоторых уральских гранитов и граносиенитов. Автором (Григорьев, 1999а) установлено, что в существенно слюдистых метасоматитах Светлинского золоторудного месторождения и в продуктах их выветривания доли масс Zr, сконцентрированные в цирконе, 26–50%. В андрадитовом скарне Южно-Песчанского железорудного месторождения вся масса Zr находится в породообразующих минералах. Анализ данных, полученных на этом направлении, показал, что доли масс Zr, сконцентрированные в цирконе зависят от валового содержания Zr в горных породах и от минерального состава последних (Григорьев, 1999).

Данные отмеченных направлений исследований совпадают только в качественном отношении. Количественные оценки роли циркона существенно отличаются, но в литературе (в основном советской) рассеяны результаты тысяч количественных определений содержания циркона и других циркониевых минералов в горных породах. Они были основой очередного приближения к пониманию действительной ситуации. При расчете средние со-

держания Zr и Hf в циркониевых минералах и Hf в цирконе (1.1%) определены приблизительно по литературным данным. Средние содержания циркониевых минералов в горных породах рассчитаны по опубликованным результатам количественных минералогических анализов более чем 2480 проб горных пород. Наиболее детально изучены пески и песчаники (более 1100 проб), граниты (> 350 проб), гранодиориты и прочие гранитоиды повышенной основности (350 проб), сиениты (> 325 проб), базиты (106 проб), метабазиты (> 71 пробы), парагнейсы и прочие парасланцы (66 проб). Количество изученных проб по каждой из остальных горных пород или неизвестно, или меньше 50. Ниже перечислены главные источники исходных данных.

*Пески, песчаники* Русской платформы, Северного Приуралья и Южного Урала от четвертичных до нижнерифейских (Карякин, 1951; Ронов и др., 1963; Челышев и др., 1965; Ильин, Сыромятина, 1972; Сергеева, 1989; Кузнецов, 1992), Восточной Камчатки (Малиновский, 1990), палеозойские Центрального Таджикистана (Бабкин, 1986).

*Глины, сланцы* Русской платформы от триасовых до плиоценовых (Челышев, 1965; Кузнецов, 1992), Западной Сибири юрские и четвертичные (Плуман, 1975; Шумилова, 1971).

*Карбонатные породы.* Известняки Русской платформы от меловых до докембрийских (Тимофеев, 1960).

*Вулканиды осадочного слоя.* Кавказские липариты, андезиты, базальты, порфириты: липарит-дацитовые андезитовые, долеритовые, диабазовые (Ляхович, Чирвинская, 1961; Ляхович, 1963; Држбашян, 1965; Мнацаканян, 1965).

*Граниты и гранодиориты.* Гранитоиды СССР (Ляхович, 1967; Бартисян, 1968; Туровский, Кокарев, 1968; Чернышов, 1971; Вигорова, Покровский, 1973; Щербаков, 1975; Бушляков, Соболев, 1976; Чашухина, 1991) и докембрийские Венесуэлы (Kalliokoski, 1965).

*Сиениты* СССР (Батиева, Бельков, 1984, 1985; Бельков и др., 1988; Еськова и др., 1964; Кузнецов, 1976; Леонова, Погиблова, 1961; Поляков, Кот, 1965; Туровский, Кокарев, 1968; Фишман и др., 1968) и Нью-Джерси (Yung, 1971).

*Базиты.* Докембрийские габброиды Украинского щита (Чернышов, 1971), уральские габброиды, габбро-диабазы, диабазы и порфириты (Соболев, 1965, 1968; Фишман и др., 1968).

*Ультрабазиты.* Уральские дуниты (Соболев, 1968) и перидотиты (Фишман и др., 1968); докембрийские дуниты, перидотиты, серпентиниты Украинского щита (Чернышов, 1971).

*Метапесчаники.* Докембрийские метапесчаники, конгломераты, кварциты Приполярного Урала (Фишман и др., 1966; Вигорова, Покровский, 1973); докембрийские кварциты Киргизии (Кокарев и др., 1986).

*Парагнейсы.* Рифейские парасланцы Рудных гор (Ермолаев и др., 1976); докембрийские парасланцы Приполярного Урала (Вигорова, Покровский, 1973); метаосадочные сланцы предкарельского комплекса (Кейвская и Стрельнинская серии Балтийского щита) (Вулканизм..., 1987); докембрийские кристаллические сланцы Украинского щита (Щербаков, 1975; Носырев и др., 1986).

Таблица 12.9

**Роль циркониевых минералов как носителей Zr в верхней части континентальной коры**

| Минералы  | Среднее содержание Zr в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|-----------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|           |                                      | Содержание минералов, % | Доли масс Zr, % | Содержание минералов, % | Доли масс Zr, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Zr, % |
| Эвдиалит  | 9.3                                  | Не опр.                 | Не опр.         | $1.5 \cdot 10^{-5}$     | 0.01            | $1.1 \cdot 10^{-5}$                | 0.01            |
| Ловенит   | 16.5                                 | Не опр.                 | Не опр.         | $3.3 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $2.5 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Циртолит  | 36.4                                 | $1.6 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $2 \cdot 10^{-6}$       | < 0.01          | $1.9 \cdot 10^{-6}$                | < 0.01          |
| Наэгит    | 40.9                                 | Не опр.                 | Не опр.         | $4.3 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01          | $3.3 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01          |
| Циркон    | 45.5                                 | 0.0064                  | 18.2            | 0.011                   | 31.3            | 0.01                               | 28.4            |
| Бадделеит | 71.8                                 | $1.3 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | Не опр.                 | Не опр.         | $3.1 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Сумма     |                                      |                         | 18.21           |                         | 31.31           |                                    | 28.41           |

*Метакарбонатные породы.* Кальцифиры Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Гранито-гнейсы* уральские и юго-восточной Тувы (Ляхович, 1967), Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984), Кольского полуострова (Бельков и др., 1988).

*Метариолиты.* Метаморфизованные кварцевые порфиры, кварцевые амфиболиты и метадациты Приполярного Урала (Фишман и др., 1966, 1968).

*Метаандезиты.* Протерозойские безрудные амфиболиты вольфрамового месторождения на Северном Кавказе (Кременецкий, Овчинников, 1986); часть докембрийских амфиболитов Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Метабазиты.* Метабазальты из Уральской сверхглубокой скважины СГ-4 (Гурбанов, Бубнов, 1999); аподиабазовые амфиболиты и зеленые сланцы Неройского района Приполярного Урала (Крылова и др., 1986); послеордовикские метадиабазы Приполярного Урала (Фишман и др., 1966); докембрийские габбро-амфиболиты и амфиболиты Центрального Памира (Акрамов, Дусматов, 1989); аподиабазовые и апогнейсовые мигматиты Криворожской зоны (Троценко, 1975).

Согласно полученным данным, в верхней части континентальной коры в цирконе сконцентрировано 28.4% масс Zr и 24% масс Hf, роль остальных циркониевых минералов мала (табл. 12.9). Осадочный слой характеризуется относительно малой ролью циркона. Здесь в цирконе сконцентрировано 18.2% масс Zr и 18% масс Hf. Максимальной ролью циркона здесь характеризуются кислые вулканиты (табл. 12.10). В них существенна и роль циртолита (0.33% масс Zr). Несколько меньше роль циркона в песках и песчаниках, здесь заметна роль бадделеита (0.02% масс Zr). Отметим, что по пескам и песчаникам автор использовал в несколько раз больше данных, чем А.Б. Ронов с коллегами (1963), но значение среднего содержания циркона получил то же. В гранитно-гнейсовом слое в цирконе сконцентрировано 31.3% масс Zr и 26% масс Hf. В магматических породах гранитно-гнейсового слоя кроме циркона заметную роль играет циртолит (0.01% масс Zr). Среди этих пород максимальной ролью циркона, характеризуются сиениты.

**Доли масс Zr и Hf, сконцентрированные  
в цирконе в континентальных горных породах**

| Горные породы                                        | Среднее содержа-<br>ние циркона,<br>% | Доли масс, % |           |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-----------|
|                                                      |                                       | Zr           | Hf        |
| Пески и песчаники                                    | 0.011                                 | 21.8         | 27        |
| Глины и глинистые сланцы                             | 0.0078                                | 18.7         | 17        |
| Карбонатные породы                                   | $5 \cdot 10^{-7}$                     | 0.004        | 0.01      |
| <b>Осадочные породы в целом</b>                      | <b>0.0069</b>                         | <b>18.5</b>  | <b>19</b> |
| Кислые вулканы                                       | 0.011                                 | 45.5         | 30        |
| Средние вулканы                                      | 0.0035                                | 14.5         | 11        |
| Основные вулканы                                     | 0.0022                                | 9.1          | 6.5       |
| <b>Вулканы осадочного слоя в целом</b>               | <b>0.0037</b>                         | <b>15.3</b>  | <b>11</b> |
| Граниты                                              | 0.016                                 | 40.4         | 45        |
| Гранодиориты                                         | 0.011                                 | 35.8         | 48        |
| Базиты                                               | 0.002                                 | 9.1          | 8         |
| Сиеиты                                               | 0.068                                 | 61.9         | 68        |
| Ультрабазиты                                         | $1.8 \cdot 10^{-5}$                   | 0.19         | 0.4       |
| <b>Магматиты гранито-гнейсового слоя<br/>в целом</b> | <b>0.013</b>                          | <b>37</b>    | <b>42</b> |
| Метапесчаники                                        | 0.029                                 | 77.6         | 68        |
| Парагнейсы и парасланцы                              | 0.014                                 | 42.5         | 28        |
| Метаморфизованные карбонатные породы                 | $7 \cdot 10^{-6}$                     | 0.19         | Не опр.   |
| Параметаморфические породы в целом                   | 0.015                                 | 45.5         | 32        |
| Гранито-гнейсы                                       | 0.0057                                | 13.7         | 12        |
| Метариолиты                                          | 0.014                                 | 37.5         | 20        |
| Метаандезиты                                         | 0.0009                                | 2.6          | Не опр.   |
| Метабазиты                                           | 0.0009                                | 3.7          | 4         |
| <b>Ортометаморфические породы в целом</b>            | <b>0.0051</b>                         | <b>12.9</b>  | <b>11</b> |

В них существенна также роль эвдиалита (4.3% масс Zr) и циртолита (0.66% масс Zr). В гранитах кроме циркона заметно влияние торита (0.01% масс Zr, при среднем содержании Zr в торите 0.96 %). Среди параметаморфических пород максимальной ролью циркона характеризуются метапесчаники, минимальной – карбонатные породы (см. табл. 12.10). Метапесчаники в этом отношении сопоставимы с сиеитами. Ортометаморфические породы в целом характеризуются небольшой ролью циркона. Здесь заметна также роль циртолита, в котором находится 0.01% масс Zr. Это следствие аналогичной роли циртолита в гранито-гнейсах.

### 12.2.3. Обсуждение полученных данных

Приводимое значение среднего содержания Zr и Hf в верхней части континентальной коры близко к опубликованным в последние годы, что косвенно свидетельствует о том, что приводимые данные о среднем содержании этих элементов в горных породах пока могут считаться достаточно кор-

ректными. Этот же вывод относится и к данным о распределении масс Zr и Hf в ассоциации горных пород, представляющих собой верхнюю часть континентальной коры.

Корректность данных о роли максиминералов как носителей Zr и Hf предопределяется качеством исходных данных. Для расчетов использованы в основном данные, полученные микрообогатительными методами. Они дают наиболее достоверные результаты, хотя тоже несовершенны. Наиболее распространенные методы позволяют учитывать лишь частицы крупнее 30–50 мкм, поэтому почти все исходные данные преуменьшены. Исключением, возможно, являются данные по сиенитам и метапесчаникам. Для корректного определения масштабов преуменьшения необходимы результаты специальных исследований, подтвержденные расчетом минеральных балансов Zr. Таких данных мало, и не исключено, что они отражают, в значительной мере, индивидуальные особенности изученных разновидностей горных пород. Наиболее представительны данные В.А. Чашухиной (1991). Она использовала методику, позволившую учитывать частицы акцессорных минералов крупнее 10 мкм. По ее данным, в уральских гранитах и граносиенитах, содержащих 0.005–0.039% Zr, доли его масс, сконцентрированные в цирконе, 58–85%. По И.Н. Егорову с коллегами (1966), в кварцево-микроклиновых гранитах Улканского массива с повышенным содержанием Zr (0.033–0.091 мас.%) доли его масс, сконцентрированные в цирконе, 82–96%. В сиенитах этого же массива при обычном содержании Zr (0.041–0.052%) в цирконе сконцентрировано 72–83% его масс, а при повышенном содержании Zr (0.13%) – 92% его масс. Напомним и об отмеченных выше данных автора. Сопоставления имеющихся данных позволяют предполагать, что роль циркона, согласно табл. 12.9, преуменьшена на 1/3. Так ли это – покажет будущее. Но даже без учета отмеченного преуменьшения пока есть основания относиться к Zr как к уникальному редкому элементу. По концентрации массы в одном собственном минерале (даже при минимально возможной ее оценке) Zr превосходит остальные редкие элементы и даже некоторые, считающиеся главными.

#### 12.2.4. Выводы

Среднее содержание в верхней части континентальной коры Zr – 0.016% и Hf –  $4.5 \cdot 10^{-4}$ . Главные концентраторы Zr и Hf сиениты, но роль их как носителей этих элементов ничтожна. Главные носители Zr и Hf метаморфические породы гранитно-гнейсового слоя (63.7 и 69.5% масс соответственно).

В верхней части континентальной коры в цирконе сконцентрировано 28.4% массы Zr и 24% масс Hf. Полученные данные – очередное приближение к истине. Они нуждаются в уточнении и детализации, для чего необходимо накопление дополнительного фактического материала, особенно по содержанию циркониевых минералов в осадочных и метаморфических породах. Пока же приведенные выше цифры нужно рассматривать как минимально возможные.

## Глава 13

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ ВАНАДИЯ

---

#### 13.1. ВАНАДИЙ

##### 13.1.1. Среднее содержание и распределение масс V в верхней части континентальной коры

Приведенные здесь средние содержания V в горных породах (табл. 13.1) соответствуют данным, опубликованным раньше (Григорьев, 2003б). Соответствующее им среднее содержание V в верхней части континентальной коры (0.0121%) несколько больше, чем 0.0053–0.0107% – по данным других исследователей (Rudnick, Gao, 2004). Максимальным средним содержанием V характеризуются основные магматические породы и продукты их метаморфизма, минимальным – карбонатные породы. Главные носители массы V метаморфические породы, в которых находится 71.99% масс V. Распределение V в верхней части континентальной коры почти соответствует геохимическому балансу. Его среднее содержание в осадочных породах (0.0091%) почти соответствует тому, которое, по расчету изоалюминиевым методом, могло быть заимствовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (0.0104%).

##### 13.1.2. О минеральном балансе V

Данные о вариациях содержания ванадиевых минералов в распространенных горных породах автору не известны. Из прочих минералов-концентраторов V наиболее изучены магнетит, ильменит, титанит, гетит, однако среднее содержание V во всех перечисленных минералах меньше 0.49% (минимального для ванадиевых максиминералов по новым данным). Наибольший интерес представляют разности магнетита с повышенным содержанием Ti. Их часто называют Ti-магнетитом (титаномагнетитом). Содержание V в разностях магнетита, описанных под таким названием, варьирует от 0 (< 0.01) до 0.55%, среднее по 66 известным автору анализам – 0.24%. Таким образом, Ti-магнетит лишь условно можно считать ванадиевым максиминералом в масштабах верхней части континентальной коры.

Среднее содержание Ti-магнетита в горных породах и в верхней части континентальной коры рассчитано по результатам количественных минералогических анализов горных пород, опубликованным в литературе (см. раздел 13.2.2). Ti-магнетит был учтен только при анализах проб

Таблица 13.1

**Среднее содержание и распределение масс V, Nb, Ta в ассоциации горных пород,  
слагающих верхнюю часть континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород, отн. % | Среднее содержание, 10 <sup>-4</sup> , % |              |             | Доли масс, % |               |               |
|-------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------|--------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
|                                           |                     | V                                        | Nb           | Ta          | V            | Nb            | Ta            |
| Пески и песчаники                         | 5.11                | 75                                       | 6.4          | 1           | 3.17         | 2.66          | 3.64          |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4                | 120                                      | 11           | 1.4         | 10.31        | 9.32          | 10.36         |
| Карбонатные породы                        | 3.85                | 49                                       | 0.8          | 0.1         | 1.56         | 0.25          | 0.27          |
| Кремнистые породы                         | 0.33                | Не опр.                                  | Не опр.      | 0.3         | Не опр.      | Не опр.       | 0.07          |
| Эвапориты                                 | 0.26                | Не опр.                                  | Не опр.      | Не опр.     | Не опр.      | Не опр.       | Не опр.       |
| Кислые вулканиты                          | 0.44                | 60                                       | 26           | 1.8         | 0.22         | 0.93          | 0.56          |
| Средние вулканиты                         | 1.13                | 71                                       | 19           | 1           | 0.66         | 1.75          | 0.8           |
| Основные вулканиты                        | 2.11                | 220                                      | 10           | 0.8         | 3.84         | 1.72          | 1.2           |
| Граниты                                   | 8.21                | 38                                       | 21           | 3.6         | 2.58         | 14.04         | 21.04         |
| Гранодиориты                              | 3.38                | 91                                       | 20           | 2.8         | 2.54         | 5.51          | 6.74          |
| Базиты                                    | 1.5                 | 240                                      | 19           | 0.74        | 2.98         | 2.32          | 0.79          |
| Сиениты                                   | 0.05                | 30                                       | 35           | 2.1         | 0.01         | 0.14          | 0.08          |
| Ультрабазиты                              | 0.05                | 42                                       | 13           | 0.41        | 0.02         | 0.05          | 0.01          |
| Метапесчаники                             | 2.92                | 80                                       | 7.1          | 0.45        | 1.93         | 1.69          | 0.94          |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56               | 180                                      | 15           | 1.1         | 45.46        | 37.33         | 23.93         |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13                | 31                                       | 1.4          | 0.3         | 0.29         | 0.13          | 0.24          |
| Железистые породы                         | 0.38                | 35                                       | 14           | 0.3         | 0.11         | 0.43          | 0.08          |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21               | 86                                       | 9.8          | 1.6         | 16.5         | 18.52         | 26.43         |
| Метариолиты                               | 0.66                | 42                                       | 14           | 1.2         | 0.23         | 0.75          | 0.56          |
| Метаандезиты                              | 1.03                | 110                                      | 8.1          | 1.3         | 0.94         | 0.68          | 0.95          |
| Метабазиты                                | 3.29                | 240                                      | 6.8          | 0.56        | 6.53         | 1.82          | 1.31          |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>          | <b>121</b>                               | <b>12</b>    | <b>1.4</b>  | <b>99.88</b> | <b>100.04</b> | <b>100.00</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95               | 91                                       | 7.55         | 1.01        | 15.04        | 12.23         | 14.34         |
| Вулканиты осадочного слоя                 | 3.68                | 155                                      | 14.7         | 0.98        | 4.72         | 4.4           | 2.56          |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b>23.63</b>        | <b>100</b>                               | <b>8.65</b>  | <b>1.01</b> | <b>19.76</b> | <b>16.63</b>  | <b>16.90</b>  |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19               | 75                                       | 20.54        | 3.05        | 8.13         | 22.06         | 28.66         |
| Параметаморфиты                           | 34.99               | 165                                      | 13.89        | 1.01        | 47.79        | 39.58         | 25.19         |
| Ортометаморфиты                           | 28.19               | 104                                      | 9.48         | 1.46        | 24.2         | 21.77         | 29.25         |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой в целом</b>    | <b>76.37</b>        | <b>127</b>                               | <b>13.41</b> | <b>1.53</b> | <b>80.12</b> | <b>83.41</b>  | <b>83.10</b>  |



Таблица 13.2

**Роль Ti-магнетита как носителя V в верхней части континентальной коры  
и в слагающих ее горных породах**

| Горные породы                                         | Содержание Ti-магнетита, % | Доли масс V, сконцентрированные в Ti-магнетите, % |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|
| Вулканыты кислые                                      | 0.01                       | 0.4                                               |
| Вулканыты средние                                     | 0.05                       | 1.69                                              |
| Вулканыты основные                                    | 1.4                        | 15.27                                             |
| Вулканыты осадочного слоя в целом                     | 0.96                       | 14.86                                             |
| Граниты                                               | 0.0002                     | 0.01                                              |
| Базиты                                                | 2                          | 20                                                |
| Сиениты                                               | 0.013                      | 1.04                                              |
| Ультрабазиты                                          | 0.3                        | 17.14                                             |
| Магматические породы гранитно-гнейсового слоя в целом | 0.23                       | 7.36                                              |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b>             | <b>0.066</b>               | <b>1.3</b>                                        |

Таблица 13.3

**Минеральный баланс V в магматических породах**

| Минералы     | Гранит, проба 522 |         |    | Гранодиорит, проба 7031 |         |     |
|--------------|-------------------|---------|----|-------------------------|---------|-----|
|              | 1                 | 2       | 3  | 1                       | 2       | 3   |
| Шпинель      | Не обн.           | Не опр. | 0  | Не обн.                 | Не опр. | 0   |
| Магнетит     | 0.3               | 0.1     | 10 | 1                       | 0.13    | 19  |
| Ильменит     | 0.1               | 0.044   | 1  | 1                       | 0.096   | 14  |
| Оливин       | Не обн.           | Не опр. | 0  | Не обн.                 | Не опр. | 0   |
| Эпидот       | 0.4               | 0.006   | 1  | 6                       | 0.01    | 9   |
| Пироксены    | Не обн.           | Не опр. | 0  | Не обн.                 | Не опр. | 0   |
| Амфибол      | Не обн.           | Не опр. | 0  | 7                       | 0.011   | 11  |
| Биотит       | 5                 | 0.009   | 15 | 13                      | 0.013   | 24  |
| Серпентин    | Не обн.           | Не опр. | 0  | Не обн.                 | Не опр. | 0   |
| Плаггиоклазы | 30                | 0.0009  | 9  | 60                      | 0.003   | 26  |
| Микроклин    | 30                | 0.006   | 60 | Не обн.                 | Не опр. | 0   |
| В породе     | 65.8              | 0.003   | 96 | 88                      | 0.007   | 103 |

| Минералы     | Оливиновый норит |         |     | Пироксенит, проба 127 |            |    |
|--------------|------------------|---------|-----|-----------------------|------------|----|
|              | 1                | 2       | 3   | 1                     | 2          | 3  |
| Шпинель      | 1.5              | 0.04    | 8   | Не обн.               | Не опр.    | 0  |
| Магнетит     | 1*               | 0.6     | 75  | 3                     | 0.056      | 5  |
| Ильменит     | Не обн.          | Не опр. | 0   | Не обн.               | Не опр.    | 0  |
| Оливин       | 18               | Не обн. | 0   | 16                    | Не обн.    | 0  |
| Эпидот       | Не обн.          | Не опр. | 0   | Не обн.               | Не опр.    | 0  |
| Пироксены    | 2                | 0.004   | 1   | 70                    | 0.05-0.023 | 83 |
| Амфибол      | 10               | 0.009   | 11  | Не обн.               | Не опр.    | 0  |
| Биотит       | Не обн.          | Не опр. | 0   | Не обн.               | Не опр.    | 0  |
| Серпентин    | Не обн.          | Не опр. | 0   | 11                    | 0.016      | 5  |
| Плаггиоклазы | 67               | 0.001   | 8   | Не обн.               | Не опр.    | 0  |
| Микроклин    | Не обн.          | Не опр. | 0   | Не обн.               | Не опр.    | 0  |
| В породе     | 99.5             | 0.008   | 103 | 100                   | 0.035      | 93 |

Примечания. Гранит и гранодиорит Верхисетского массива на Урале (Бушляков, Соболев, 1958), не учтен кварц. Оливиновый норит Южно-Калифорнийского батолита, расчет по данным (Sen et al., 1959); \* вероятно, Ti-магнетит. Пироксенит из Азербайджана, расчет по данным (Абдуллаев, 1992). Здесь и в табл. 13.4: 1 – содержание минералов в горных породах, %; 2 – содержание V в минералах и горных породах, %; 3 – доли масс V, находящиеся в минералах и их сумма, %.

Минеральный баланс V в метаморфических породах

| Минералы    | Метагаббро проба 78-112 |         |    | Горнблендит 17 |         |      | Амфиболитизированное габбро, проба 6 |         |     |
|-------------|-------------------------|---------|----|----------------|---------|------|--------------------------------------|---------|-----|
|             | 1                       | 2       | 3  | 1              | 2       | 3    | 1                                    | 2       | 3   |
| Магнетит    | 2.2                     | 0.34    | 25 | 0.9            | 0.28    | 5.6  | 3                                    | 0.32    | 17  |
| Ильменит    | 8.6                     | 0.035   | 10 | 0.1            | 0.095   | 0.2  | 5.1                                  | 0.16    | 15  |
| Гранат      | 19.7                    | 0.033   | 22 | Не обн.        | Не опр. | 0    | Не обн.                              | Не опр. | 0   |
| Пироксены   | 16.8                    | 0.012   | 7  | Не обн.        | Не опр. | 0    | Не обн.                              | Не опр. | 0   |
| Амфибол     | 30.8                    | 0.028   | 29 | 97             | 0.04    | 86.2 | 46.3                                 | 0.084   | 69  |
| Плагиоклазы | 21.9                    | Не обн. | 0  | 2              | 0.045   | 2    | 45.6                                 | Не обн. | 0   |
| В породе    | 100                     | 0.03    | 94 | 100            | 0.045   | 94   | 100                                  | 0.056   | 101 |

Примечания. Метагаббро – проба 78-112 из Восточного Саяна (Механошин и др., 1986). Горнблендит – проба 17 из Качканарского массива и амфиболитизированное габбро – проба 6 из Медвежьего массива (Фоминых, 1991).

магматических горных пород. Разности магнетита с повышенным содержанием Ti, установленные при количественных минералогических анализах метаморфических пород, в большинстве случаев были названы магнетитом. Расчет по имеющимся данным показал, что роль Ti-магнетита как носителя V наиболее значительна в основных породах, как вулканогенных, так и интрузивных (табл. 13.2). В верхней части континентальной коры, согласно имеющимся данным, в Ti-магнетите сконцентрировано 1.3% массы V.

Имеются эпизодические данные о вариациях минеральных балансов V в магматических породах (табл. 13.3), продуктах их метаморфизма (табл. 13.4), а также в некоторых околорудных метасоматитах и продуктах их выветривания (Григорьев, 1999). В исследованных пробах ванадиевые минералы не обнаружены. В изученных пробах горных пород V, как правило, находится почти полностью в породообразующих минералах. Главные его концентраторы магнетит (включая Ti-магнетит), ильменит, гетит (Григорьев, 1999). Сконцентрированные в них доли массы V сильно варьируют (в магнетите от 3 до 75%). Закономерности вариаций пока не установлены.

### 13.1.3. Выводы

Согласно полученным данным, среднее содержание V в верхней части континентальной коры 0.0121%. В Ti-магнетите сконцентрировано 1.3% той массы V, которая имеется в верхней части континентальной коры. Эти данные пока могут быть приняты за неимением более корректных. Для получения более точных данных требуется постановка специальных исследований.

## **13.2. НИОБИЙ И ТАНТАЛ**

### **13.2.1. Среднее содержание и распределение масс Nb и Ta в верхней части континентальной коры**

Приведенные здесь (см. табл. 13.1) средние содержания Nb и Ta в континентальных породах соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2003б). Им соответствуют средние содержания в верхней части континентальной коры Nb 0.0012% и Ta  $1.4 \cdot 10^{-4}$  %. Эти величины не выходят за пределы публиковавшихся в течение последних 50 лет (Rudnick, Gao, 2004): Nb – 0.00098–0.0026% и Ta –  $7.4 \cdot 10^{-5}$ – $5.7 \cdot 10^{-4}$  %. Распределение Nb и Ta в верхней части континентальной коры приближается к требованиям геохимического баланса. Их средние содержания в совокупности осадочных пород (Nb 0.00076 и Ta 0.0001%) близки к тем, которые могли быть унаследованы при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (Nb 0.0011, Ta 0.00012%, расчет изоалюминиевым методом). Главные концентраторы Nb сиениты, Ta – граниты, но в сиенитах сконцентрировано всего 0.14% масс Nb, а в гранитах – 21.04% массы Ta. Главные носители Nb и Ta метаморфические породы гранитно-гнейсового слоя (61.35% масс Nb и 54.44% масс Ta).

### **13.2.2. Доли масс Nb и Ta, сконцентрированные в ниобиевых и танталовых минералах**

Минеральный баланс Nb и Ta изучали только на примере редкометалльных руд, гранитоидов (включая сиениты и пегматиты), а также кор выветривания гранитоидов. На постановку исследований горных пород оказало влияние представление о том, что Nb и Ta в земной коре в основном рассеяны в породообразующих минералах, поэтому часть минеральных балансов Nb и Ta рассчитана с учетом только породообразующих минералов (Бровчук и др., 1969; Недашковский и др., 1969). Суммы учтенных долей масс Nb и Ta в таких неполных минеральных балансах составляют 11–115% от тех масс этих элементов, которые соответствуют их содержаниям в исследованных пробах горных пород. Согласно результатам более корректных исследований (Еськова, 1959; Толок, 1964; Косалс, Мазуров, 1970; Косалс, 1976; Солодов и др., 1987; Чашухина и др., 1989; Григорьев, 1999) в горных породах, в большинстве случаев существенная часть масс Nb и Ta сконцентрирована в акцессорных минералах: ниобиевых, танталовых, титановых, циркониевых, редкоземельных, ториевых, урановых, оловянных. Содержание Nb в танталовых минералах и Ta в ниобиевых почти всегда больше минимального для максиминералов: Nb 0.3% и Ta 0.1% (Григорьев, 1999). В остальных минералах-концентраторах содержание Nb и Ta в большинстве случаев меньше отмеченного, поэтому ниже рассматривается только роль ниобиевых и танталовых минералов в качестве максиминералов Nb и Ta.

Средние содержания Nb и Ta в минералах определены по литературным данным приблизительно. Среднее содержание минералов в горных породах

рассчитано по опубликованным результатам количественных минералогических анализов более чем 3416 проб горных пород. Наиболее изучены пески и песчаники осадочного слоя (> 1164 проб), граниты (> 690 проб), сиениты (> 539 проб), гранодиориты и прочие гранитоиды повышенной основности (459 проб), базиты (> 96 проб), метабазиты (> 84 проб), ультрабазиты (> 84 проб), основные вулканы (60 проб). Количество изученных проб по каждой из остальных горных пород или не известно, или меньше 50. Ниже перечислены главные источники исходных данных.

*Пески, песчаники* Русской платформы, Северного Приуралья и Южного Урала от четвертичных до нижнерифейских (Карякин, 1951; Ронов и др., 1963; Челышев и др., 1965; Ильин, Сыромятина, 1972; Сергеева, 1989; Кузнецов, 1992), восточной Камчатки (Малиновский, 1990), Азербайджана и Приверхоянского прогиба (Справочное руководство..., 1958), палеозойские Центрального Таджикистана (Бабкин, 1986).

*Глины, сланцы* Русской платформы от верхнепермских до плиоценовых (Саркисян, 1949; Челышев и др., 1965; Кузнецов, 1992); юрские и четвертичные Западной Сибири (Плунан, 1975; Шумилова, 1971).

*Карбонатные породы.* Известняки Русской платформы (Саркисян, 1949).

*Кремнистые породы* харьковского яруса Украины (Карякин, 1954).

*Вулканы осадочного слоя.* Кавказские и восточно-сибирские липариты, андезиты, базальты, порфириты: липарит-дацитовые, андезитовые, долеритовые, диабазовые (Петров, 1945; Ляхович, Чирвинская, 1961; Ляхович, 1963; Држбашян, 1965; Мнацаканян, 1965; Ипатьева, Соловьев, 1982).

*Граниты СССР* (Ляхович, 1967; Вигорова, Покровский, 1973; Щербаков, 1975; Ипатьева, 1976; Бельков, 1979; Винокурова, 1982; Недашковский, 1982; Чашухина, 1991).

*Гранодиориты СССР* включая кварцевые диориты, диориты, плагиограниты (Ляхович, 1967; Туровский, Кокарев, 1968; Бартикян, 1968; Фишман и др., 1968; Чернышов, 1971; Щербаков, 1975; Бушляков, Соболев, 1976).

*Сиениты СССР* (Туровский, Кокарев, 1968; Фишман, 1968; Бельков, 1979; Батиева, Бельков, 1984, 1985; Бельков и др., 1988; Еськова и др., 1964; Тихоненкова, 1982).

*Базиты.* Докембрийские габброиды Украинского щита (Чернышов, 1971; Чернышов, Плаксенко, 1982); уральские габброиды, габбро-диабазы, диабазы и порфириты (Соболев, 1965, 1968; Фишман и др., 1968); дальневосточные габбро (Недашковский, 1982).

*Ультрабазиты.* Уральские дуниты, пироксениты (Соболев, 1968) и перидотиты (Фишман и др., 1968); докембрийские дуниты, перидотиты, серпентиниты Украинского щита (Чернышов, 1971; Чернышов, Плаксенко, 1982).

*Метапесчаники.* Докембрийские метапесчаники, конгломераты, кварциты Приполярного Урала (Фишман и др., 1966; Вигорова, Покровский, 1973; Крылова и др., 1986), Тувы (Ляхович, 1966), Украинского щита (Носырев и др., 1986); кварциты Киргизии (Кокарев и др., 1986).

*Парагнейсы.* Рифейские парасланцы Рудных гор (Ермолаев и др., 1976); докембрийские парагнейсы и парасланцы Кольского полуострова, Украинского щита, Урала, Тувы (Ляхович, 1966; Вигорова, Покровский, 1973; Носырев и др., 1986; Вулканизм..., 1987).

*Метакарбонатные породы.* Кальцифиры Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Гранито-гнейсы* Кольского полуострова, Урала и юго-восточной Тувы (Ляхович, 1966, 1967; Бельков и др., 1988), Дальнего Востока (Недашковский, 1982).

*Метариолиты.* Метаморфизованные кварцевые порфиры, кварцевые амфиболиты и метадациты Урала (Фишман и др., 1966, 1968; Гурбанов и др., 1999).

*Метаандезиты.* Протерозойские безрудные амфиболиты вольфрамового месторождения на Северном Кавказе (Кременецкий, Овчинников, 1986) и часть докембрийских амфиболитов Украинского щита (Носырев и др., 1986).

*Метабазиты.* Метабазальты из Уральской сверхглубокой скважины СГ-4 (Гурбанов и др., 1999); метадиабазы, аподиабазовые амфиболиты и зеленые сланцы Приполярного Урала (Фишман и др., 1966; Крылова и др., 1986); докембрийские габбро-амфиболиты и амфиболиты Центрального Памира (Акрамов, Дусматов, 1986); аподиабазовые и апогнейсовые мигматиты Криворожской зоны (Троценко, 1975).

Ниобиевые и танталовые минералы были установлены только в гранитоидах (включая сиениты), парасланцах и гранито-гнейсах. Расчет выполнен в предположении, что в остальных горных породах этих минералов практически нет.

**Ниобий.** Согласно полученным данным, роль ниобиевых минералов как носителей Nb существенна в гранитно-гнейсовом слое и верхней части континентальной коры в целом (табл. 13.5). Она максимальна в сиенитах и гранитах, заметна в гранодиоритах (табл. 13.6). В парасланцах установлен ильменорутил (среднее содержание  $2 \cdot 10^{-7} \%$ ), а в гранито-гнейсах – пироксид ( $2 \cdot 10^{-6} \%$ ). Сконцентрированные в них доли массы Nb соответственно:

Таблица 13.5

**Роль ниобиевых и танталовых минералов как носителей Nb в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Среднее содержание Nb, % | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                          | Содержание минералов, % | Доли масс Nb, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Nb, % |
| Микролит     | 2.6                      | $1 \cdot 10^{-8}$       | < 0.01          | $7.6 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Делоренцит   | 2.9                      | $8.6 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $6.6 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Лопарит      | 6.4                      | $1.3 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $1 \cdot 10^{-6}$                  | < 0.01          |
| Велерит      | 7.5                      | $1.7 \cdot 10^{-11}$    | < 0.01          | $1.3 \cdot 10^{-11}$               | < 0.01          |
| Танталит     | 11.2                     | $3.5 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $2.6 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Бломстрандин | 11.7                     | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $9 \cdot 10^{-7}$                  | 0.01            |
| Ильменорутил | 12.6                     | $3.3 \cdot 10^{-5}$     | 0.32            | $2.5 \cdot 10^{-5}$                | 0.26            |
| Эвксенит     | 16.5                     | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.11            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.09            |
| Фергусонит   | 30.6                     | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.07            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.06            |
| Пироксид     | 39.6                     | $1.3 \cdot 10^{-6}$     | 0.04            | $1 \cdot 10^{-6}$                  | 0.03            |
| Колумбит     | 46.9                     | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.31            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.26            |
| Сумма        |                          | $6.5 \cdot 10^{-5}$     | 0.87            | $5.2 \cdot 10^{-5}$                | 0.71            |

Таблица 13.6

**Доли масс Nb (%), сконцентрированные в ниобиевых и танталовых минералах гранитоидов**

| Минералы     | Граниты                      | Гранодиориты                 | Сиениты                      | Гранитоиды в целом           |
|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Микролит     | < 0.01 ( $1 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                      | Не опр.                      | < 0.01 ( $6 \cdot 10^{-8}$ ) |
| Делоренцит   | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.01 ( $1.3 \cdot 10^{-5}$ ) | < 0.01 ( $5 \cdot 10^{-8}$ ) |
| Лопарит      | 0.01 ( $1.8 \cdot 10^{-6}$ ) | < 0.01 ( $6 \cdot 10^{-7}$ ) | 3.11 (0.0017)                | 0.02 ( $7.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Велерит      | Не опр.                      | Не опр.                      | < 0.01 ( $1 \cdot 10^{-7}$ ) | < 0.01 ( $4 \cdot 10^{-9}$ ) |
| Танталит     | 0.02 ( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                      | 0.01 ( $2 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Бломстрандин | 0.05 ( $8.7 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                      | 1.1 ( $3.3 \cdot 10^{-4}$ )  | 0.04 ( $6.7 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Ильменорутит | 1.8 (0.0003)                 | 0.11 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                      | 1.17 ( $1.9 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Эвксенит     | 0.63 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                      | < 0.01 ( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.4 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )    |
| Фергусонит   | 0.22 ( $1.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.49 ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.03 ( $3.8 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.27 ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Пирохлор     | 0.09 ( $5 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.04 ( $2 \cdot 10^{-6}$ )   | 1.13 (0.0001)                | 0.08 ( $4 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Колумбит     | 1.79 ( $8 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                      | 1.14 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Сумма        | 4.61                         | 0.64                         | 5.38                         | 3.13                         |

Примечание. В скобках дано содержание минералов в %.

Таблица 13.7

**Роль ниобиевых и танталовых минералов как носителей Ta в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Ta, % | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                  | Содержание минералов, % | Доли масс Ta, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Ta, % |
| Велерит      | 0.15             | $1.7 \cdot 10^{-11}$    | < 0.01          | $1.3 \cdot 10^{-11}$               | < 0.01          |
| Лопарит      | 0.55             | $1.3 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $1 \cdot 10^{-6}$                  | < 0.01          |
| Фергусонит   | 1                | $3.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.02            | $2.4 \cdot 10^{-6}$                | 0.02            |
| Пирохлор     | 2.1              | $1.3 \cdot 10^{-6}$     | 0.02            | $1 \cdot 10^{-6}$                  | 0.02            |
| Бломстрандин | 2.7              | $1.2 \cdot 10^{-6}$     | 0.02            | $9 \cdot 10^{-7}$                  | 0.02            |
| Ильменорутит | 4.5              | $3.3 \cdot 10^{-5}$     | 0.99            | $2.5 \cdot 10^{-5}$                | 0.8             |
| Эвксенит     | 5.9              | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.34            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.28            |
| Колумбит     | 7.2              | $8.6 \cdot 10^{-6}$     | 0.41            | $6.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.34            |
| Делоренцит   | 28.8             | $8.6 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $6.6 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Танталит     | 51.5             | $3.5 \cdot 10^{-7}$     | 0.12            | $2.6 \cdot 10^{-7}$                | 0.1             |
| Микролит     | 58.5             | $1 \cdot 10^{-8}$       | < 0.01          | $7.6 \cdot 10^{-9}$                | < 0.01          |
| Всего        |                  | $6.5 \cdot 10^{-5}$     | 1.92            | $4.9 \cdot 10^{-5}$                | 1.58            |

< 0.01 и 0.08%. Роль танталовых минералов как носителей Nb во всех объектах ничтожна.

**Тантал.** Суммарные доли масс Ta, сконцентрированные в ниобиевых минералах гранитно-гнейсового слоя и верхней части континентальной коры, больше соответствующих суммарных долей масс Nb (табл. 13.7). Это предопределяется в основном соответствующей ситуацией в гранитах и сиенитах (табл. 13.8). В парасланцах в ильменорутите сконцентрировано 0.01% от всей имеющейся здесь массы Ta. В гранито-гнейсах на

**Доли масс Та (%), сконцентрированные в ниобиевых и танталовых минералах гранитоидов в**

| Минералы     | Граниты | Гранодиориты | Сиениты | Гранитоиды в целом |
|--------------|---------|--------------|---------|--------------------|
| Велерит      | < 0.01  | Не опр.      | Не опр. | < 0.01             |
| Лопарит      | < 0.01  | < 0.01       | 4.45    | 0.01               |
| Фергусонит   | 0.04    | 0.11         | 0.02    | 0.06               |
| Пироклор     | 0.03    | 0.02         | 1       | 0.03               |
| Бломстрандин | 0.07    | Не опр.      | 4.24    | 0.06               |
| Ильменорутит | 3.75    | 0.29         | Не опр. | 2.85               |
| Эвксенит     | 1.31    | Не опр.      | < 0.01  | 0.98               |
| Колумбит     | 1.6     | Не опр.      | Не опр. | 1.2                |
| Делоренцит   | Не опр. | Не опр.      | 1.78    | < 0.01             |
| Танталит     | 0.43    | Не опр.      | Не опр. | 0.34               |
| Микролит     | 0.02    | Не опр.      | Не опр. | 0.01               |
| Всего        | 7.25    | 0.42         | 11.49   | 5.54               |

пироклор приходится 0.03% масс Та. Роль танталовых минералов в качестве носителей Та существенна только в сиенитах и гранитах (см. табл. 13.8).

### 13.2.3. Обсуждение полученных данных

Новые значения среднего содержания Nb и Та в верхней части континентальной коры близки к публиковавшимся в последние 50 лет, что является косвенным подтверждением того, что большинство приводимых данных о среднем содержании Nb и Та в горных породах пока может считаться достаточно корректным. Некоторые сомнения вызывают средние содержания Та в гранитах и гранодиоритах. Цифры  $3.6 \cdot 10^{-4} \%$  и  $2.8 \cdot 10^{-4} \%$ , заимствованные автором у Л.Н. Овчинникова (1990), вероятно, преувеличены приблизительно в 2 раза, приводимые значения долей масс Та, находящихся в этих гранитоидах в составе максиминералов, вероятно, преуменьшены. Кроме того, нужно иметь в виду, что исходные данные о содержании акцессорных минералов в горных породах получены микрообогатительными методами. Они допускали учет частиц эндогенных ниобиевых и танталовых минералов крупностью 50–250 или > 30–50 мкм, причем не исключено, что эта возможность не всегда была реализована, в частности при изучении осадочных пород. По физическим свойствам эндогенные ниобиевые и танталовые минералы похожи на более распространенные минералы (титановые, редкоземельные и др.). Исследования уральских минералогов (включая автора) показали, что частицы ниобиевых и танталовых минералов изменяют внешний вид уже на начальных стадиях выветривания. Так, в каолинит-гидрослюдистых зонах кор выветривания гранитоидов минералы ряда колумбит–танталит представлены частицами неправильной формы с землистыми поверхностями. Правильная диагностика таких частиц возможна только при специально поставленных исследованиях. Экзогенные ниобиевые и

танталовые минералы вообще изучены слабо. Они известны в виде охристых образований. Возможность учета их стандартными методами количественных минералогических анализов практически исключена. Таким образом, исходные данные соответствуют не истинным, а минимально возможным значениям содержания ниобиевых и танталовых минералов в горных породах.

Анализ данных о минеральных балансах Nb и Ta в конкретных пробах горных пород показал, что роль ниобиевых и танталовых минералов в целом уменьшается при увеличении содержания таких титановых минералов, как ильменит и титанит, а также биотита, амфиболов и некоторых других. В гранитоидах и корах их выветривания, характеризующихся пониженными или умеренными содержаниями титановых минералов, ниобиевые минералы появляются при содержании Nb, близком к кларковому. Главными носителями Nb и Ta ниобиевые и танталовые минералы бывают при содержаниях данных элементов в горных породах, превосходящих кларковые в десятки и сотни раз. Новые данные не противоречат этому положению.

#### **13.2.4. Выводы**

В верхней части континентальной коры среднее содержание Nb 0.0012, Ta – 0.00014%. Главные концентраторы Nb сиениты, Ta – граниты, но в сиенитах сконцентрировано всего 0.14% масс Nb, а в гранитах – 21.04% масс Ta. Главные носители Nb и Ta метаморфические породы гранитно-гнейсового слоя (61.35% массы Nb и 54.44% масс Ta). Установлено, что в верхней части континентальной коры в ниобиевых минералах сконцентрировано 0.71% масс Nb, в том числе в ильменорутите 0.26, колумбите – 0.26, эвксените – 0.09, фергусоните 0.06, пироклоре – 0.03, блонстрандине – 0.01%; в ниобиевых и танталовых минералах сконцентрировано 1.58% масс Ta, в том числе в ильменорутите – 0.8, колумбите – 0.34, эвксените – 0.28, танталите – 0.1, фергусоните – 0.02, блонстрандине – 0.02, пироклоре – 0.02%. Эти цифры минимально возможные. Роль ниобиевых и танталовых минералов как носителей Nb и Ta максимальная в гранитах и сиенитах, значительная – в гранодиоритах (включая другие гранитоиды повышенной основности). Вопрос о роли ниобиевых и танталовых минералов как носителей Nb и Ta в других горных породах континентальной коры остается открытым.



#### 14.1. ХРОМ

##### 14.1.1. Среднее содержание и распределение масс Cr в верхней части континентальной коры

Приведенные здесь средние содержания Cr в горных породах (табл. 14.1) соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2003б). Среднее содержание Cr в верхней части континентальной коры 0.0092% не выходит за пределы значений 0.0035–0.0112%, опубликованных другими авторами в последние 50 лет (Rudnick, Gao, 2004). Наблюдается четкая тенденция последовательного увеличения содержаний Cr от кислых пород к ультраосновным, распределение его контрастное. Средние коэффициенты концентрации в ультрабазитах 19.5, метабазитах – 2.6, парагнейсах и парасланцах – 1.5. В главных концентраторах Cr ультрабазитах сосредоточено всего 0.97% его массы. Главные носители Cr метаморфические породы, в которых находится 74.72% его масс. Распределение Cr в верхней части континентальной коры практически соответствует требованиям геохимического баланса, его среднее содержание в осадочных породах (0.0077%) практически соответствует тому, которое могло быть заимствовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (0.0079%).

##### 14.1.2. Роль хромита как носителя Cr

Распределение масс Cr в минеральных ассоциациях предопределяется тенденцией изоморфного замещения им Al и Fe, поэтому Cr преимущественно слабо концентрируется в алюминиевых и железных минералах, особенно в листовых и цепочечных силикатах, а также магнетите и шпинели. Но содержание больше 0.6% – минимального для максиминералов (Григорьев, 1999), встречается в этих минералах относительно редко. Пока есть основания считать, что в масштабах верхней части континентальной коры к максиминералам Cr относятся только его собственные минералы. При количественных минералогических анализах горных пород из хромовых минералов учитывали только хромшпинели (хромшпинелиды), причем, как правило, под общим названием «хромит». Так они названы и здесь. Данные о характере их распределения противоречивы. Петрологи, минералоги широкой специализации и геохимики отмечают хромшпинели исключительно в дунитах, гарцбургитах, лерцолитах, троктолитах, оливиновых габброидах

Таблица 14.1

**Распределение масс Cr, Mo, W в совокупности горных пород  
верхней части континентальной коры**

| Горные породы                             | Масса пород, % | Среднее содержание, 10 <sup>-4</sup> % |             |             | Доли масс, % |              |              |
|-------------------------------------------|----------------|----------------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
|                                           |                | Cr                                     | Mo          | W           | Cr           | Mo           | W            |
| Пески и песчаники                         | 5.11           | 58                                     | 1.5         | 1.6         | 3.21         | 4.91         | 4.03         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4           | 110                                    | 1.6         | 2.6         | 12.38        | 10.67        | 13.32        |
| Карбонатные породы                        | 3.85           | 20                                     | 1.6         | 1.2         | 0.83         | 3.95         | 2.28         |
| Кремнистые породы                         | 0.33           | 32                                     | Не опр.     | Не опр.     | 0.11         | Не опр.      | Не опр.      |
| Эвапориты                                 | 0.26           | Не опр.                                | Не опр.     | Не опр.     | Не опр.      | Не опр.      | Не опр.      |
| Кислые вулканиты                          | 0.44           | 8.5                                    | 1.8         | 1.4         | 0.04         | 0.51         | 0.3          |
| Средние вулканиты                         | 1.13           | 30                                     | 1.4         | 1.4         | 0.37         | 1.01         | 0.78         |
| Основные вулканиты                        | 2.11           | 130                                    | 1.4         | 1.1         | 2.97         | 1.89         | 1.14         |
| Граниты                                   | 8.21           | 7.8                                    | 1.4         | 2.2         | 0.69         | 7.37         | 8.9          |
| Гранодиориты                              | 3.38           | 22                                     | 1.1         | 1.6         | 0.81         | 2.38         | 2.66         |
| Базиты                                    | 1.5            | 175                                    | 1.5         | 0.75        | 2.84         | 1.44         | 0.55         |
| Сиениты                                   | 0.05           | 2                                      | 1.1         | 1.3         | < 0.01       | 0.04         | 0.03         |
| Ультрабазиты                              | 0.05           | 1800                                   | 0.3         | 0.16        | 0.97         | 0.01         | < 0.01       |
| Метапесчаники                             | 2.92           | 65                                     | 1.5         | 2.1         | 2.05         | 2.81         | 3.02         |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56          | 140                                    | 1.9         | 2.6         | 46.3         | 37.22        | 39.14        |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13           | 43                                     | 1.2         | 1.7         | 0.53         | 0.87         | 0.95         |
| Железистые породы                         | 0.38           | 36                                     | 4           | Не опр.     | 0.15         | 0.97         | Не опр.      |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21          | 61                                     | 1.3         | 1.4         | 15.32        | 19.34        | 16.01        |
| Метариолиты                               | 0.66           | 33                                     | 1.2         | Не опр.     | 0.24         | 0.51         | Не опр.      |
| Метаандезиты                              | 1.03           | 47                                     | 2.2         | Не опр.     | 0.52         | 1.45         | Не опр.      |
| Метабазиты                                | 3.29           | 270                                    | 1.2         | 4           | 9.61         | 2.53         | 6.48         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>     | <b>92.4</b>                            | <b>1.56</b> | <b>2.03</b> | <b>99.94</b> | <b>99.88</b> | <b>99.59</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95          | 76.6                                   | 1.53        | 2           | 16.53        | 19.53        | 19.63        |
| Вулканиты осадочного слоя                 | 3.68           | 85                                     | 1.45        | 1.23        | 3.38         | 3.41         | 2.22         |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b>23.63</b>   | <b>78.1</b>                            | <b>1.53</b> | <b>1.88</b> | <b>19.91</b> | <b>22.94</b> | <b>21.85</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19          | 37.2                                   | 1.33        | 1.87        | 5.31         | 11.24        | 12.14        |
| Параметаморфиты                           | 34.99          | 129                                    | 1.86        | 2.5         | 49.03        | 41.87        | 43.11        |
| Оргометаморфиты                           | 28.19          | 84.2                                   | 1.32        | 1.62        | 25.69        | 23.83        | 22.49        |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой в целом</b>    | <b>76.37</b>   | <b>96.8</b>                            | <b>1.57</b> | <b>2.07</b> | <b>80.03</b> | <b>76.94</b> | <b>77.74</b> |

Доли масс Cr, сконцентрированные в хромите

| Горные породы                             | Среднее содержание хромита, $10^{-4}\%$ | Доли масс Cr, % |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|
| Пески и песчаники                         | 0.0003                                  | 1.6             |
| Глины и глинистые сланцы                  | 0.0001                                  | 0.28            |
| Средние вулканы                           | $7 \cdot 10^{-5}$                       | 0.72            |
| Основные вулканы                          | 0.0004                                  | 0.95            |
| Гранодиориты                              | $6 \cdot 10^{-6}$                       | 0.08            |
| Базиты                                    | 0.0029                                  | 5.14            |
| Ультрабазиты                              | 0.2                                     | 34.44           |
| Парагнейсы и парасланцы                   | $1 \cdot 10^{-6}$                       | < 0.01          |
| Метариолиты                               | $3 \cdot 10^{-5}$                       | 0.28            |
| Метабазиты                                | 0.0002                                  | 2.3             |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b><math>1.9 \cdot 10^{-4}</math></b>   | <b>0.64</b>     |
| Осадочные породы                          | $1.3 \cdot 10^{-4}$                     | 0.52            |
| Вулканы осадочного слоя                   | $2.5 \cdot 10^{-4}$                     | 0.91            |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b><math>1.5 \cdot 10^{-4}</math></b>   | <b>0.6</b>      |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 0.0011                                  | 9.22            |
| Параметаморфиты                           | $9 \cdot 10^{-7}$                       | < 0.01          |
| Ортометаморфиты                           | $2.4 \cdot 10^{-5}$                     | 0.09            |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой в целом</b>    | <b>0.0002</b>                           | <b>0.64</b>     |

Примечание. При среднем содержании Cr в хромшпинелях 31%.

и в продуктах метаморфизма ультрабазитов. Специалисты по аксессуарным минералам отмечают хромит в большинстве горных пород. Для расчетов использованы в основном эти данные. Главные первоисточники данных перечислены в разделе 13.2.2. Среднее содержание хромита в осадочных породах  $1.3 \cdot 10^{-4}\%$ . От гранитно-гнейсового слоя современного состава могло быть заимствовано содержание  $1.6 \cdot 10^{-4}\%$ . Такое соотношение цифр могло бы рассматриваться как свидетельство значительной устойчивости хромита в зоне гипергенеза. Последнее вызывает сомнение, однако объективных данных для корректировок пока нет.

При дальнейших расчетах среднее содержание Cr в хромите (31%) определено приблизительно по результатам анализов, преимущественно заимствованных из справочников. Согласно полученным данным, роль хромита как носителя Cr в верхней части континентальной коры относительно мала (табл. 14.2), причем в осадочном и гранитно-гнейсовом слоях она соизмерима. Очень большой ролью хромита характеризуются ультрабазиты, значительной – базиты и метабазиты.

Опубликовано много данных, позволяющих рассчитать минеральные балансы Cr в конкретных разновидностях горных пород. В лерцолите о-ва Тубуаи (Полинезия), содержащем 0.165% Cr, в хромшпинели сконцентрировано 17% его массы (Berger, 1985). В гранитоидах Верхисетского массива (Урал), содержащих 0.003–0.0045% Cr, почти вся его масса слабо сконцентрирована в биотите, роговых обманках и эпидоте (Бушляков, Соболев, 1976). В оливиновом норите южно-калифорнийского батолита,

содержащем 0.02% Cr, 60% его масс сконцентрировано в максиминерале – магнетите (содержание Cr в магнетите 1.2%) и 37% масс – в шпинели (содержание Cr в шпинели 0.5%) (Sen et al., 1959). В гарцбургитах Восточного Саяна (Сутурин, 1978), о-ва Руруту в Полинезии (Berger, 1985) и Малого Кавказа (Абдуллаев, 1992), содержащих 0.26–1.02% Cr, в хромите сконцентрировано 12–90% его масс. В дунитах Восточного Саяна (Сутурин, 1978), содержащих 0.18–0.68% Cr, в хромите сконцентрировано 70–95% его масс. В уральских метасоматитах по ультрабазитам, содержащих 0.15–0.32% Cr, в хромите сконцентрировано 23–67% его масс (Сазонов, 1986). В эклогитах из Центральной Европы, содержащих 0.014 и 0.018% Cr, согласно имеющимся данным, 90–92% его масс слабо сконцентрировано в породообразующих силикатах (Rost, Grigel, 1964). Чем обусловлен заметный дефицит минеральных балансов Cr, неясно. В уральском аподиабазовом амфиболите, содержащем 0.023% Cr, этот элемент слабо сконцентрирован в хлорите, амфиболе и эпидоте (Сазонов, 1989). Таким образом, наиболее изучены ультрабазиты и продукты их метаморфизма. Наблюдается тенденция прямой зависимости роли хромита от содержания Cr и оливина в ультрабазитах. Эта часть минеральных балансов не противоречит приведенным выше результатам определения роли хромита как носителя Cr в ассоциации горных пород, представляющей верхнюю часть континентальной коры.

### **14.1.3. Выводы**

Согласно полученным данным, среднее содержание Cr в верхней части континентальной коры 0.0092%. Главные носители Cr метаморфические породы, в которых находится 74.72% его масс. В ассоциации горных пород, представляющих верхнюю часть континентальной коры, в хромшпинелях сконцентрировано 0.64% масс Cr.

## **14.2. МОЛИБДЕН**

### **14.2.1. Среднее содержание и распределение масс Mo в верхней части континентальной коры**

Приведенные здесь значения среднего содержания Mo в горных породах (табл. 14.1) частично соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2003б), частично исправлены. Главные источники дополнительных данных, использованных при корректировке среднего содержания Mo и W в горных породах (Беус и др., 1976; Глухан, Серых, 1999–2001; Катченков, 1964; Кременецкий, Овчинников, 1986; Кременецкий и др., 1990; Маслов и др., 2004; Резницкий и др., 2004; Сафронов, Розен, 2004; Ярославский, Скорнякова, 1974). Соответствующее новым данным среднее содержание Mo в верхней части континентальной коры  $1.56 \cdot 10^{-4} \%$  немного больше чем  $7.8 \cdot 10^{-5}$ – $1.5 \cdot 10^{-4} \%$ , по литературным данным (Rudnick, Gao, 2004), однако разница значительно меньше возможных погрешностей определения дан-

ной величины. Зависимость среднего содержания Мо от состава горных пород выражена слабо. Исключения: очень низкое среднее содержание Мо в ультрабазитах и очень высокое в железистых породах. Последнее вызывает сомнение, но данных для уточнения содержания Мо в железистых породах пока недостаточно. Распределение Мо в верхней части континентальной коры практически соответствует требованиям геохимического баланса. Его среднее содержание в осадочных породах верхней части континентальной коры  $1.53 \cdot 10^{-4} \%$  почти соответствует тому, которое могло быть замещено от гранитно-гнейсового слоя современного состава, –  $1.3 \cdot 10^{-4} \%$ . Главные носители Мо метаморфические породы, в которых сосредоточено 65.7% масс Мо.

#### 14.2.2. Роль максиминералов как носителей Мо

Минералами-концентраторами Мо, кроме его собственных, обычно являются вольфрамовые минералы, а также биотит, амфиболы, магнетит, ильменит, иногда фергусонит, циркон, но содержание  $> 0.08\%$  (соответствующее максиминералам) характерно только для шеелита. При минералогических анализах горных пород из молибденовых минералов учитывали только молибденит, изредка – повеллит. При определении среднего содержания шеелита, молибденита и повеллита в горных породах использованы опубликованные в литературе результаты количественных и полуколичественных минералогических анализов более чем 3000 проб горных пород. Главные первоисточники данных перечислены в разделе 13.2.2. При расчете некоторые данные учтены с коэффициентами, приблизительно соответствующими частоте встречаемости проанализированных разновидностей горных пород.

Установлено, что роль молибденита в качестве носителя Мо существенно больше суммарной роли остальных максиминералов. В верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 4.64% масс Мо (табл. 14.3). В гранитно-гнейсовом слое эта доля еще больше, а в осадочном – минимальная, причем в осадочном слое максиминералы Мо установлены только в песках (шеелит  $1.5 \cdot 10^{-7} \%$ , молибденит  $2 \cdot 10^{-8} \%$ ) и кислых вулканитах (шеелит  $3 \cdot 10^{-5} \%$ , молибденит  $4 \cdot 10^{-5} \%$ ). Доли масс Мо, сконцентрированные в этих минералах, соответственно: в песках  $< 0.01$  и  $0.01\%$ , в кислых вулканитах – 0.57 и 13.9%. Согласно полученным данным, максимальной концентрацией Мо в максиминералах характеризуются гранодиориты, на втором месте – граниты (табл. 14.4), на третьем – метариолиты (табл. 14.5).

Опубликовано более 100 минеральных балансов Мо, относящихся преимущественно к гранитоидам с содержанием Мо  $2 \cdot 10^{-5}$ – $3.2 \cdot 10^{-4} \%$ . Они делятся на две неравные группы. Согласно большинству данных (Козлов, Рощупкина, 1965; Петрова, 1972; Редкие элементы..., 1972; Самаркин, Самаркина, 1978; Kuroda, Sandell, 1954), преобладает тенденция рассеяния и слабой концентрации Мо в породообразующих минералах. Минеральные балансы этой группы часто характеризуются недостатками сумм учтенных долей масс Мо. Согласно данным второй группы, в гранитоидах, содержа-

Таблица 14.3

**Роль максиминералов как носителей Мо в верхней части континентальной коры**

| Минералы   | Содержание Мо в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|            |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Мо, % | Содержание минералов, % | Доли масс Мо, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Мо, % |
| Шеелит     | 3.4                          | $5.9 \cdot 10^{-7}$     | 0.01            | $8.3 \cdot 10^{-6}$     | 0.18            | $6.5 \cdot 10^{-6}$                | 0.14            |
| Вульфенит  | 25.6                         | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-9}$     | < 0.01          | $4 \cdot 10^{-9}$                  | < 0.01          |
| Повеллит   | 45.5                         | Не опр.                 | Не опр.         | $5.2 \cdot 10^{-8}$     | 0.01            | $4 \cdot 10^{-8}$                  | 0.01            |
| Молибденит | 59.9                         | $7.9 \cdot 10^{-7}$     | 0.33            | $1.6 \cdot 10^{-5}$     | 5.99            | $1.2 \cdot 10^{-5}$                | 4.49            |
| Сумма      |                              | $1.35 \cdot 10^{-6}$    | 0.34            | $2.4 \cdot 10^{-5}$     | 6.18            | $1.9 \cdot 10^{-5}$                | 4.64            |

Таблица 14.4

**Доли массы Мо (%), сконцентрированные в максиминералах в магматических породах**

| Минералы   | Граниты                          | Гранодиориты                    | Базиты                          | Сиениты                         | Ультрабазиты                  | Магматические породы            |
|------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Шеелит     | 1.07<br>( $4.4 \cdot 10^{-5}$ )  | 0.62<br>( $2 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                         | 0.05<br>( $1.6 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                       | 0.86<br>( $3.3 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Вульфенит  | 0.01<br>( $4 \cdot 10^{-8}$ )    | < 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-8}$ ) | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                       | 0.01<br>( $3 \cdot 10^{-8}$ )   |
| Повеллит   | 0.16<br>( $5 \cdot 10^{-7}$ )    | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                       | 0.11<br>( $3 \cdot 10^{-7}$ )   |
| Молибденит | 12.84<br>( $3 \cdot 10^{-5}$ )   | 21.78<br>( $4 \cdot 10^{-5}$ )  | 3.71<br>( $9.3 \cdot 10^{-6}$ ) | 1.63<br>( $3 \cdot 10^{-6}$ )   | 3.99<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 13.82<br>( $3 \cdot 10^{-5}$ )  |
| Сумма      | 14.08<br>( $7.4 \cdot 10^{-5}$ ) | 22.4<br>( $6 \cdot 10^{-5}$ )   | 3.71<br>( $9.3 \cdot 10^{-6}$ ) | 1.68<br>( $4.6 \cdot 10^{-6}$ ) | 3.99<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 14.8<br>( $6.3 \cdot 10^{-5}$ ) |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 14.5

**Доли массы Мо (%), сконцентрированные в максиминералах метаморфических пород**

| Минералы   | Метапесчаники                   | Парасланцы                      | Гранито-гнейсы                  | Метариолиты                      | Метаандезиты                    | Метабазиты                      |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Шеелит     | Не опр.                         | 0.09<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                         | 0.28<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )    | 0.15<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.28<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Молибденит | 7.19<br>( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) | 5.67<br>( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) | 3.92<br>( $8.5 \cdot 10^{-6}$ ) | 8.99<br>( $1.8 \cdot 10^{-6}$ )  | < 0.1<br>( $7 \cdot 10^{-9}$ )  | 0.8<br>( $1.6 \cdot 10^{-6}$ )  |
| Всего      | 7.19<br>( $1.8 \cdot 10^{-5}$ ) | 5.76<br>( $2.3 \cdot 10^{-5}$ ) | 3.92<br>( $8.5 \cdot 10^{-6}$ ) | 9.27<br>( $1.18 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.15<br>( $9.3 \cdot 10^{-5}$ ) | 1.08<br>( $1.2 \cdot 10^{-5}$ ) |

щих от  $7 \cdot 10^{-5}$  до  $1.5 \cdot 10^{-4}$  %, в молибдените сконцентрировано от 17 до 80% масс Мо. Есть тенденция прямой зависимости долей масс Мо, сконцентрированных в молибдените, от валового содержания Мо в гранитоидах (Редкие элементы..., 1972; Григорьев, 1999). Эти материалы свидетельствуют о значительном влиянии генезиса гранитоидов на минеральный баланс Мо. В целом же они не противоречат той части новых данных, которая относится к гранитоидам.

### 14.2.3. Выводы

Согласно полученным данным, среднее содержания Мо в верхней части континентальной коры  $1.56 \cdot 10^{-4} \%$ . Главные носители Мо метаморфические породы, в которых сосредоточено 65.7 масс Мо. В максиминералах сконцентрировано 4.64% масс Мо, в том числе в молибдените – 4.49, шеелите – 0.14, повеллите – 0.01.

## 14.3. ВОЛЬФРАМ

### 14.3.1. Среднее содержание и распределение масс W в верхней части континентальной коры

Приведенные здесь средние содержания W в горных породах (см. табл. 14.1) частично соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2003б), частично исправлены. Главные источники дополнительных данных, использованных при корректировке среднего содержания W, перечислены выше. Приводимое здесь значение среднего содержания W в верхней части континентальной коры  $2.03 \cdot 10^{-4} \%$  не выходит за пределы значений  $9.1 \cdot 10^{-5}$ – $3.3 \cdot 10^{-4} \%$ , опубликованных другими авторами в последние 50 лет (Rudnick, Gao, 2004). Зависимость среднего содержания W от состава горных пород выражена слабо. Исключение – сомнительная величина среднего содержания W в метабазах. Распределение W в верхней части континентальной коры практически соответствует требованиям геохимического баланса. Его среднее содержание в континентальных осадочных породах  $2 \cdot 10^{-4} \%$  близко к  $1.7 \cdot 10^{-4} \%$  – тому, которое могло быть заимствовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава. Главные носители W метаморфические породы, в которых сосредоточено 65.6% всей массы W.

### 14.3.2. Роль максиминералов как носителей вольфрама

Повышенные содержания W наиболее характерны для некоторых молибденовых, титановых и железных минералов, но содержание  $> 0.1\%$  (соответствующее максиминералам) характерно только для вольфрамовых минералов и повеллита. При определении среднего содержания вольфрамовых минералов и повеллита в горных породах использованы опубликованные в литературе результаты количественных и полуколичественных минералогических анализов более чем 3000 проб горных пород. Главные первоисточники данных перечислены в разделе 13.2.2. Отмеченные минералы установлены только в некоторых пробах. Предполагалось, что если в пробе они не установлены, то их там не было. При расчете некоторые данные учтены с коэффициентами, приблизительно соответствующими частоте встречаемости проанализированных разностей горных пород. Пример – среднее содержание вольфрамита и шеелита в песках и песчаниках. Совместно с этими породами учтен близкий к ним по составу делювий. В двух его

Таблица 14.6

**Роль максиминералов как носителей W в верхней части континентальной коры**

| Минералы   | Содержание W в минералах, % | Осадочный слой          |                | Гранитно-гнейсовый слой |                | Верхняя часть континентальной коры |                |
|------------|-----------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|
|            |                             | Содержание минералов, % | Доли масс W, % | Содержание минералов, % | Доли масс W, % | Содержание минералов, %            | Доли масс W, % |
| Повеллит   | 3.14                        | Не опр.                 | Не опр.        | $5.2 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01         | $4 \cdot 10^{-8}$                  | < 0.01         |
| Вольфрамит | 59.5                        | $6.5 \cdot 10^{-8}$     | 0.02           | $1 \cdot 10^{-6}$       | 0.28           | $7.8 \cdot 10^{-7}$                | 0.23           |
| Шеелит     | 61.6                        | $5.9 \cdot 10^{-7}$     | 0.19           | $8.3 \cdot 10^{-6}$     | 2.43           | $6.5 \cdot 10^{-6}$                | 2              |
| Сумма      |                             | $6.55 \cdot 10^{-7}$    | 0.21           | $9.4 \cdot 10^{-6}$     | 2.71           | $7.3 \cdot 10^{-6}$                | 2.23           |

Таблица 14.7

**Доли масс W (%), сконцентрированные в максиминералах гранитоидов**

| Минералы   | Граниты                       | Гранодиориты               | Сиениты                      | В целом                       |
|------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Повеллит   | 0.01 ( $5 \cdot 10^{-7}$ )    | Не опр.                    | Не опр.                      | 0.01 ( $3 \cdot 10^{-7}$ )    |
| Вольфрамит | 2.7 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )     | 0.04 ( $1 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                      | 1.88 ( $6 \cdot 10^{-6}$ )    |
| Шеелит     | 12.32 ( $4.4 \cdot 10^{-5}$ ) | 7.7 ( $2 \cdot 10^{-5}$ )  | 0.76 ( $1.6 \cdot 10^{-6}$ ) | 10.7 ( $3.3 \cdot 10^{-5}$ )  |
| Сумма      | 15.03 ( $5.4 \cdot 10^{-5}$ ) | 7.74 ( $2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.76 ( $1.6 \cdot 10^{-6}$ ) | 12.59 ( $3.9 \cdot 10^{-5}$ ) |

пробах содержание вольфрамита 0.0055 и 0.01%, а шеелита – 0.005 и 0.0025%. Содержание W в изученном делювии не определяли (Воронов, 1999), но только за счет вольфрамита и шеелита в этом делювии содержание W не может быть меньше 0.007%, т. е. валовое содержание W в изученном делювии превышало кларковое по меньшей мере в десятки раз. Такой концентрацией химических элементов обычно характеризуются относительно небольшие массы горных пород, поэтому отмеченные данные учтены с коэффициентом 0.01.

Установлено, что в верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 2.23% масс W (табл. 14.6). В гранитно-гнейсовом слое эта доля больше, а в осадочном – минимальная. Причем в осадочном слое максиминералы W установлены только в двух группах горных пород: песках (вольфрамит  $3 \cdot 10^{-7}$ , шеелит –  $1.5 \cdot 10^{-7}$  %) и кислых вулканитах (шеелит  $3 \cdot 10^{-5}$  %). В песках в вольфрамите сконцентрировано 0.11% масс W, шеелите – 0.06, в кислых вулканитах в шеелите сконцентрировано 13.2% W. Согласно полученным данным, максимальной концентрацией W в максиминералах характеризуются граниты (табл. 14.7).

Минеральные балансы W определяли преимущественно в гранитах, отчасти в гнейсах и онгонитах. Имеются две группы данных. Согласно одним (Антипин и др., 1981; Косалс, Мазуров, 1970; Редкие элементы..., 1972; Ярославский, Скорнякова, 1974), в гранитах, гнейсах, онгонитах, содержащих  $8 \cdot 10^{-5}$ – $4.4 \cdot 10^{-4}$  % W, вольфрамовых минералов нет. Согласно данным второй группы, в гранитоидах, содержащих  $8 \cdot 10^{-5}$ – $7.2 \cdot 10^{-4}$  % W, в шеелите сконцентрировано от 24 до 80% его масс. Преобладает тенденция прямой зависимости долей масс W, сконцентрированных в шеелите, от валового содержания W в гранитоидах (Редкие элементы..., 1972). Как и в случае с Мо,



эти материалы свидетельствуют о значительном влиянии генезиса гранитоидов на минеральный баланс W и в целом не противоречат новым данным, относящимся к гранитоидам.

В заключение повторим, что методы количественных определений содержания акцессорных минералов в горных породах дают возможность учета лишь частиц крупнее 10–50, а иногда даже крупнее 100 мкм, поэтому к приведенным величинам нужно относиться как к минимально возможным.

#### **14.3.3. Выводы**

Среднее содержание W в верхней части континентальной коры  $2.03 \cdot 10^{-4} \%$ . Зависимость среднего содержания W от состава горных пород выражена слабо. Главные носители W метаморфические породы, содержащие 65.6% всей массы W. В максиминералах сконцентрировано 2.23% масс W, в том числе в вольфрамите 0.23, шеелите – 2%. Эти цифры минимально возможные. Они нуждаются в детализации и уточнении, но коррективы возможны только после специальных исследований.

## Глава 15

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАРГАНЦА, ЖЕЛЕЗА, КОБАЛЬТА, НИКЕЛЯ

---

#### 15.1. МАРГАНЕЦ

##### 15.1.1. Среднее содержание и распределение масс Mn в верхней части континентальной коры

Средние содержания Mn в осадочных и параметаморфических породах, гранито-гнейсах и метаандезитах (табл. 15.1) рассчитаны вновь. Главные источники исходных данных (Анфимов, 1997; Афанасьева, 1979, 1983; Варганова и др., 1971; Вотяков и др., 1997; Глухан, Серых, 1999, 2000, 2001; Гречин, 1971; Данченко, Чочия, 1983; Ерофеев, Цеховский, 1983; Залманзон, Шишова, 1952; Карбонатные..., 1975; Катченков, Флегонтова, 1955; Кременецкий, Овчинников, 1986; Кременецкий и др., 1990; Макрыгина, 1981; Макрыгина и др., 1994; Маслов, Ишерская, 2005; Парначев, 1987; Пачатжанов, 1981; Первухина, Дробинина, 1955; Петров, 1982; Подковырков, 2001; Ронов, Ермишкина, 1959; Ронов и др., 1990; Созинов и др., 1988; Сочава, 1979; Страхов и др., 1959, 1968; Condie et al., 1991, 2001; Di Leo, 2002; Huber et al., 2001; Yang et al., 1998). Средние содержания Mn в гранитах и гранодиоритах приведены по Л.Н. Овчинникову (1990), в остальных горных породах – по А.Б. Ронову с соавторами (1990) с небольшими поправками. Вычисленное на этой основе среднее содержание Mn в верхней части континентальной коры (0.0767%) находится в пределах (0.054–0.077%) данных других исследователей (Rudnick, Gao, 2004). Среднее содержание Mn максимальное в ультраосновных и основных (магматических и оргометаморфических), а также в метакарбонатных породах, минимальное – в эвапоритах. По новым данным, зависимость среднего содержания Mn от состава горных пород (исключая эвапориты) выражена слабо. Средние коэффициенты концентрации (без эвапоритов) варьируют от 0.52 (гранито-гнейсы) до 1.96 (ультрабазиты). В верхней части континентальной коры Mn избыточный элемент. Его среднее содержание в осадочных породах 0.073% больше того, которое могло быть заимствовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (0.061% по определению изоалюминиевым методом). Главные носители Mn осадочные и параметаморфические породы, в которых сосредоточено 63.73% всей его массы.

Таблица 15.1  
Среднее содержание и распределение масс Mn, Fe, Co, Ni в ассоциации горных пород верхней части континентальной коры

| Горные породы                             | Масса пород, % | Среднее содержание, % |             |                      |                      | Доли масс, % |              |              |              |
|-------------------------------------------|----------------|-----------------------|-------------|----------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                           |                | Mn                    | Fe          | Co                   | Ni                   | Mn           | Fe           | Co           | Ni           |
| Пески и песчаники                         | 5.11           | 0.059                 | 3.21        | 0.0013               | 0.0035               | 3.93         | 4.04         | 3.9          | 3.61         |
| Глины и глинистые сланцы                  | 10.4           | 0.08                  | 4.71        | 0.0019               | 0.0049               | 10.85        | 12.07        | 11.61        | 10.27        |
| Карбонатные породы                        | 3.85           | 0.077                 | 1.09        | 5.1·10 <sup>-4</sup> | 0.0019               | 3.87         | 1.03         | 1.15         | 1.48         |
| Кремнистые породы                         | 0.33           | 0.11                  | 3.19        | 1.3·10 <sup>-4</sup> | 0.0037               | 0.47         | 0.26         | 0.03         | 0.25         |
| Эвапориты                                 | 0.26           | 0.0008                | 0.029       | Не опр.              | Не опр.              | < 0.01       | < 0.01       | Не опр.      | Не опр.      |
| Кислые вулканы                            | 0.44           | 0.059                 | 1.5         | 4.8·10 <sup>-4</sup> | 0.0008               | 0.34         | 0.16         | 0.12         | 0.07         |
| Средние вулканы                           | 1.13           | 0.11                  | 5.04        | 0.0019               | 0.0051               | 1.62         | 1.4          | 1.26         | 1.16         |
| Основные вулканы                          | 2.11           | 0.14                  | 8.06        | 0.003                | 0.0073               | 3.85         | 4.19         | 3.72         | 3.1          |
| Граниты                                   | 8.21           | 0.042                 | 1.83        | 0.0001               | 3.5·10 <sup>-4</sup> | 4.5          | 3.7          | 0.48         | 0.58         |
| Гранодиориты                              | 3.38           | 0.075                 | 3.3         | 7.8·10 <sup>-4</sup> | 0.0016               | 3.31         | 2.75         | 1.55         | 1.09         |
| Базиты                                    | 1.5            | 0.14                  | 8.25        | 0.0048               | 0.014                | 2.74         | 3.05         | 4.23         | 4.23         |
| Сиениты                                   | 0.05           | 0.12                  | 3.31        | 0.0003               | 0.0004               | 0.08         | 0.04         | 0.01         | < 0.01       |
| Ультрабазиты                              | 0.05           | 0.15                  | 10.4        | 0.015                | 0.2                  | 0.1          | 0.13         | 0.44         | 2.02         |
| Метапесчаники                             | 2.92           | 0.086                 | 3.47        | 0.0016               | 0.0046               | 3.27         | 2.5          | 2.75         | 2.71         |
| Парагнейсы и парасланцы                   | 30.56          | 0.098                 | 4.41        | 0.0019               | 0.0078               | 39.05        | 33.19        | 34.12        | 48.06        |
| Метакарбонатные породы                    | 1.13           | 0.13                  | 1.56        | 6.9·10 <sup>-4</sup> | 0.0012               | 1.91         | 0.43         | 0.46         | 0.27         |
| Железистые породы                         | 0.38           | 0.076                 | 24.14       | 0.0005               | 0.0018               | 0.38         | 2.26         | 0.11         | 0.14         |
| Гранито-гнейсы                            | 23.21          | 0.04                  | 3.55        | 0.0017               | 0.0023               | 12.10        | 20.29        | 23.18        | 10.76        |
| Метариолиты                               | 0.66           | 0.059                 | 3.02        | 0.0009               | 0.0027               | 0.51         | 0.49         | 0.35         | 0.36         |
| Метаандезиты                              | 1.03           | 0.11                  | 5.38        | 0.0017               | 0.004                | 1.48         | 1.37         | 1.03         | 0.83         |
| Метабазиты                                | 3.29           | 0.13                  | 8.08        | 0.0049               | 0.0130               | 5.58         | 6.55         | 9.47         | 8.62         |
| <b>Верхняя часть континентальной коры</b> | <b>100</b>     | <b>0.0767</b>         | <b>4.06</b> | <b>0.0017</b>        | <b>0.005</b>         | <b>99.94</b> | <b>99.9</b>  | <b>99.97</b> | <b>99.61</b> |
| Осадочные породы                          | 19.95          | 0.0734                | 3.54        | 0.0014               | 0.0038               | 19.12        | 17.4         | 16.69        | 15.61        |
| Вулканы осадочного слоя                   | 3.68           | 0.121                 | 6.35        | 0.00236              | 0.0058               | 5.81         | 5.75         | 5.1          | 4.33         |
| <b>Осадочный слой в целом</b>             | <b>23.63</b>   | <b>0.0809</b>         | <b>3.98</b> | <b>0.00157</b>       | <b>0.0042</b>        | <b>24.93</b> | <b>23.15</b> | <b>21.79</b> | <b>19.94</b> |
| Магматиты гранитно-гнейсового слоя        | 13.19          | 0.0623                | 2.97        | 0.000866             | 0.00298              | 10.73        | 9.67         | 6.71         | 7.92         |
| Параметаморфиты                           | 34.99          | 0.0978                | 4.45        | 0.00182              | 0.00725              | 44.61        | 38.38        | 37.44        | 51.18        |
| Ортометаморфиты                           | 28.19          | 0.0536                | 4.13        | 0.00206              | 0.00362              | 19.67        | 28.7         | 34.03        | 20.57        |
| <b>Гранитно-гнейсовый слой в целом</b>    | <b>76.37</b>   | <b>0.0753</b>         | <b>4.08</b> | <b>0.00174</b>       | <b>0.00517</b>       | <b>75.01</b> | <b>76.75</b> | <b>78.18</b> | <b>79.67</b> |

### 15.1.2. Вариации концентрации масс Mn в осадочных и параметаморфических породах

Основа расчета – частота встреч проб с разным содержанием Mn. Главные источники перечислены выше. Использована только наименее свернутая часть опубликованных данных: результаты анализов конкретных проб и средние по 2–5, редко – по 6–30 анализам одинаковых горных пород. Анализы марганцевых руд, встреченных в виде мелких тел в опробованных горных породах, учтены с коэффициентами, соответствующими мощности этих тел. Установлено, что 64.71–83.47% масс горных пород характеризуется содержанием Mn меньше кларкового (табл. 15.2). Высокое же содержа-

Таблица 15.2

#### Соотношение масс осадочных и параметаморфических пород (%) с разным содержанием Mn

| Содержание Mn, % | Осадочные породы |                  |                    |                   | Параметаморфические породы |                  |                        |
|------------------|------------------|------------------|--------------------|-------------------|----------------------------|------------------|------------------------|
|                  | Пески, песчаники | Глины, аргиллиты | Карбонатные породы | Кремнистые породы | Метапесчаники, кварциты    | Парасланцы       | Метакарбонатные породы |
| < 0.077          | 83.47<br>(0.035) | 64.73<br>(0.037) | 76.96<br>(0.028)   | 68.18<br>(0.023)  | 75.17<br>(0.031)           | 64.71<br>(0.043) | 80.1<br>(0.030)        |
| 0.077–0.23       | 14.64<br>(0.11)  | 32.91<br>(0.10)  | 19.24<br>(0.11)    | 19.32<br>(0.15)   | 20.07<br>(0.12)            | 32.06<br>(0.12)  | 13.18<br>(0.13)        |
| 0.23–0.69        | 1.59<br>(0.38)   | 1.82<br>(0.38)   | 2.63<br>(0.37)     | 10.23<br>(0.41)   | 3.4<br>(0.39)              | 2.11<br>(0.36)   | 4.73<br>(0.37)         |
| > 0.69           | 0.3<br>(0.71)    | 0.54<br>(1.66)   | 1.17<br>(1.56)     | 2.27<br>(1.63)    | 1.36<br>(1.88)             | 1.12<br>(2.15)   | 1.99<br>(1.21)         |

Примечание. В скобках – среднее содержание Mn в данном интервале, %.

Таблица 15.3

#### Распределение масс Mn (%) в осадочных и параметаморфических породах с разным его содержанием

| Содержание Mn, % | Осадочные породы                |                                 |                                   |                                | Параметаморфические породы             |                          |                                       |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
|                  | Пески, песчаники<br>(1318 проб) | Глины, аргиллиты<br>(1100 проб) | Карбонатные породы<br>(1367 проб) | Кремнистые породы<br>(88 проб) | Метапесчаники, кварциты<br>(294 пробы) | Парасланцы<br>(995 проб) | Метакарбонатные породы<br>(403 пробы) |
| < 0.077          | 53.86                           | 32.74                           | 30.65                             | 12.71                          | 27.23                                  | 28.73                    | 29.12                                 |
| 0.077–0.23       | 30.94                           | 45.74                           | 30.07                             | 23.48                          | 27.38                                  | 39.14                    | 20.89                                 |
| 0.23–0.69        | 11.25<br>(1.35)                 | 9.25<br>(0.83)                  | 13.58                             | 33.92<br>(4.07)                | 15.47<br>(1.86)                        | 7.82<br>(0.7)            | 20.97                                 |
| > 0.69           | 3.95<br>(0.99)                  | 12.27<br>(4.91)                 | 25.7<br>(1.54)                    | 29.89<br>(17.93)               | 29.92<br>(17.35)                       | 24.31<br>(13.37)         | 29.02<br>(1.74)                       |
| Всего            | 100<br>(2.34)                   | 100<br>(5.74)                   | 100<br>(1.54)                     | 100<br>(22)                    | 100<br>(19.21)                         | 100<br>(14.07)           | 100<br>(1.74)                         |

Примечание. В скобках – доли масс Mn, сконцентрированные в марганцевых минералах (% от всей массы Mn, имеющейся в данной горной породе).

ние Mn ( $> 0.69\%$ ) установлено всего в  $0.3\text{--}2.27\%$  масс изученных пород. Иначе распределены массы Mn. В участках с содержанием Mn меньше кларкового для верхней части континентальной коры находится  $12.71\text{--}53.86\%$  его масс (табл. 15.3). В участках с повышенным содержанием (коэффициенты концентрации  $1\text{--}9$ ) сконцентрировано  $41.86\text{--}57.4\%$  масс Mn, с высоким содержанием (коэффициенты концентрации  $> 9$ ) –  $3.95\text{--}29.92\%$ .

### **15.1.3. О вероятной роли марганцевых минералов как носителей Mn**

Главная форма нахождения Mn в верхней части континентальной коры – концентрация (преимущественно слабая) в породообразующих темноцветных силикатах и в карбонатах. В широко распространенных разновидностях горных пород наиболее важными концентраторами Mn являются породообразующие карбонаты Ca, Mg, Fe. Они образуют изоморфные ряды с марганцевыми карбонатами, поэтому в них преобладают относительно большие содержания Mn. По данным Н.М. Страхова с коллегами (1959), содержание Mn в карбонатах из песков и глин Русской платформы, %: в кальците  $0\text{--}4.26$ , среднее  $0.81$  (173 анализа); сидерите  $0.81\text{--}4.0$ , среднее  $1.39$  (51 анализ); анкерите  $0.08\text{--}2.26$ , среднее –  $1.14$  (28 анализов). Содержание Mn в кальците карбонатных пород  $0\text{--}0.26$ , среднее –  $0.1\%$  (27 анализов); в гранатах, амфиболах, пироксенах, слюдах, гидрослюдах, смектитах и некоторых других породообразующих силикатах максимальные значения содержания Mn варьируют преимущественно от  $2$  до  $7.5\%$ , причем в эндогенных силикатах максимальные значения содержания Mn, как правило, больше, чем в экзогенных. Но разновидности всех породообразующих минералов с содержанием Mn более  $2.4\%$  (минимальное для максиминералов) (Григорьев, 1999) относительно редки. Исключение – Mn-кальцит ( $2.4\text{--}12.9\%$  Mn). Здесь он условно рассматривается как марганцевый минерал. При этом условии можно считать, что в масштабах верхней части континентальной коры максиминералы представлены только марганцевыми минералами, которые находятся в основном в осадочных, парапетаморфических и отчасти вулканогенных породах. Данных о вариациях содержаний марганцевых минералов в горных породах и рудах крайне мало, поэтому расчет средних арифметических значений их содержания обычным путем пока невозможен, но возможно приблизительное определение этих величин с помощью интерполяций и некоторых предположений. Основа – главный закон минералогической геохимии. *Суммарная роль максиминералов как носителей данного химического элемента зависит преимущественно от трех факторов: валового содержания этого элемента в данной минеральной ассоциации, минерального состава и генезиса последней. Причем влияние валового содержания тем больше, чем меньше кларковое содержание химического элемента* (Григорьев, 1999). Использование этого метода показано выше на примере решения вопроса о среднем содержании бериллиевых минералов в некоторых горных породах (см. раздел 3.1.3).

Теоретически у Mn влияние отмеченных факторов должно быть соизмеримым, но возможности учета влияния вариаций минерального состава и

генезиса горных пород на содержание в них марганцевых минералов пока крайне ограниченные. Возможен лишь приблизительный расчет среднестатистической ситуации с учетом вариаций содержаний Mn и распределения его масс в горных породах. Приблизительный расчет возможен, если известны хотя бы два значения среднего валового содержания Mn в горных породах:  $C_0$  и  $C_{100}$ .

$C_0$  – максимальное валовое содержание Mn в горной породе, при котором его максиминералов в большинстве случаев нет. Автору известны результаты количественных минералогических анализов более 2000 проб осадочных и параметаморфических пород (за исключением слабо изученных кремнистых). Эти анализы были выполнены методами, позволявшими учесть марганцевые минералы. В абсолютном большинстве случаев они не отмечены, в том числе и в результатах, полученных при изучении марганцевого рудообразования (Страхов и др., 1959, 1968). Исключение – разрез терригенных пород фанерозоя Курской магнитной аномалии, изученный А.П. Кузнецовым (1992). Здесь выполнено 783 количественных минералогических анализа, и только в плиоценовых отложениях (34 пробы) установлен псиломелан (среднее содержание 0.0012%). Валовое содержание Mn в этих пробах неизвестно. Минимальные содержания Mn в осадочных и параметаморфических породах, содержащих марганцевые минералы: 1.6–2.9% (в существенно кварцево-силикатных) и 3.55% (в существенно карбонатных), но для таких разновидностей горных пород установлен только сам факт наличия марганцевых минералов, содержание же их неизвестно. По совокупности отмеченных данных можно сделать вывод лишь о том, что  $C_0$  – больше среднего содержания Mn в горных породах. Более конкретно  $C_0$  для разных горных пород удалось приблизительно вычислить с учетом их среднего минерального состава и среднего содержания Mn в главных минералах. Результаты расчета  $C_0$ , %: пески и песчаники – 0.11, глины и сланцы – 0.15, карбонатные породы – 0.6, кремнистые породы – 0.07, метапесчаники – 0.1, парасланцы – 0.12, метакarbonаты – 0.5.

$C_{100}$  – минимальное валовое содержание Mn в горной породе, при котором в большинстве случаев почти вся масса Mn сконцентрирована в марганцевых минералах. Горные породы, содержащие марганцевые минералы, как правило, называли «марганцевыми рудами» (Марганцевое рудообразование..., 1984; Петров, 1982; Рой, 1986; Страхов и др., 1968), причем, как правило, при характеристике таких «марганцевых руд» не приводили данных ни о содержании в них марганцевых минералов, ни о минеральном балансе Mn. Исключений мало. По данным, доступным автору, почти полная концентрация Mn в марганцевых минералах установлена в окисных рудах с минимальным валовым содержанием Mn – 10.6–12%. Это руды, являющиеся продуктами выветривания некоторых карбонатных пород. В масштабах верхней части континентальной коры роль таких руд ничтожна. Практически полная концентрация Mn в марганцевых минералах характерна для осадочных окисных марганцевых руд с его валовым содержанием > 16% (Страхов и др., 1968). В осадочных карбонатных марганцевых рудах при валовом содержании Mn 16–25% его

**Предполагаемая роль марганцевых минералов как носителей Mn  
в верхней части континентальной коры**

| Минералы    | Среднее содержание Mn в минералах, % | Осадочный слой       |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|-------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|             |                                      | Содержание минералов | Доли масс Mn, % | Содержание минералов    | Доли масс Mn, % | Содержание минералов               | Доли масс Mn, % |
| Мn-кальцит  | 6.3                                  | 0.0017               | 0.13            | $5.6 \cdot 10^{-4}$     | 0.05            | $8.2 \cdot 10^{-4}$                | 0.07            |
| Якобсит     | 17.8                                 | Не опр.              | Не опр.         | $4 \cdot 10^{-4}$       | 0.1             | $3 \cdot 10^{-4}$                  | 0.07            |
| Спессартин  | 21.6                                 | $3 \cdot 10^{-6}$    | < 0.01          | 0.0033                  | 0.95            | 0.0026                             | 0.73            |
| Кутнагорит  | 23.76                                | 0.0012               | 0.35            | 0.001                   | 0.32            | 0.001                              | 0.31            |
| Родонит     | 28.87                                | Не опр.              | Не опр.         | $4.4 \cdot 10^{-4}$     | 0.17            | $3.3 \cdot 10^{-4}$                | 0.12            |
| Родохрозит  | 39.96                                | 0.0012               | 0.59            | 0.0012                  | 0.64            | 0.0012                             | 0.63            |
| Криптомелан | 42.55                                | $2.2 \cdot 10^{-4}$  | 0.12            | $2.6 \cdot 10^{-4}$     | 0.15            | $2.5 \cdot 10^{-4}$                | 0.14            |
| Вернадит    | 47.3                                 | $1.1 \cdot 10^{-4}$  | 0.06            | Не опр.                 | Не опр.         | $2.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.02            |
| Псиломелан  | 48.9                                 | $9 \cdot 10^{-4}$    | 0.54            | $1.3 \cdot 10^{-4}$     | 0.08            | $3.1 \cdot 10^{-4}$                | 0.2             |
| Голландит   | 49.2                                 | Не опр.              | Не опр.         | $8.4 \cdot 10^{-4}$     | 0.55            | $6.4 \cdot 10^{-4}$                | 0.41            |
| Браунит     | 51                                   | Не опр.              | Не опр.         | 0.0035                  | 2.37            | 0.0027                             | 1.8             |
| Тодорокит   | 52.15                                | $3.7 \cdot 10^{-4}$  | 0.24            | Не опр.                 | Не опр.         | $8.6 \cdot 10^{-5}$                | 0.06            |
| Тефроит     | 53.4                                 | Не опр.              | Не опр.         | 0.0018                  | 1.28            | 0.0014                             | 0.98            |
| Манганит    | 59.6                                 | $6.4 \cdot 10^{-4}$  | 0.47            | Не опр.                 | Не опр.         | $1.5 \cdot 10^{-4}$                | 0.12            |
| Пирролюзит  | 60.3                                 | 0.0013               | 0.97            | $3 \cdot 10^{-4}$       | 0.24            | $5.4 \cdot 10^{-4}$                | 0.43            |
| Гаусманит   | 71.11                                | Не опр.              | Не опр.         | 0.0014                  | 1.28            | 0.001                              | 0.93            |
| Всего       |                                      | 0.0076               | 3.47            | 0.015                   | 8.18            | 0.13                               | 7.02            |

масса, как правило, распределена между марганцевыми минералами и кальцитом. Почти полная концентрация Mn в марганцевых минералах характерна для осадочных карбонатных руд с содержанием Mn > 25%. На основании отмеченного  $C_{100}$  приняты: для существенно кварцево-силикатных пород – 16%, для существенно карбонатных – 25.

Вариации роли марганцевых минералов как носителей Mn в рудах из метаморфических толщ автору не известны. Предполагалось, что такие руды в этом отношении близки к осадочным.

Результаты вычислений средних суммарных долей масс Mn, сконцентрированных в марганцевых минералах горных пород, приведены в табл. 15.3. Разделение суммарных долей масс Mn между марганцевыми минералами выполнено в соответствии с частотой упоминаний этих минералов в литературе. Наиболее важные источники данных (Брусницын, 2000; Рой, 1986; Старикова и др., 2004; Страхов и др., 1968).

Результаты приблизительного расчета позволяют предполагать, что в верхней части континентальной коры в марганцевых минералах сконцентрировано 7.02% масс Mn (табл. 15.4). Роль их в осадочном слое меньше, чем в гранитно-гнейсовом. Главная роль в качестве концентраторов-носителей Mn принадлежит в осадочных породах пирролюзиту, родохрозиту, псиломелану, манганиту и кутнагориту (табл. 15.5), в параметаморфических – брауниту, гаусманиту, тефроиту, спессартину и родохрозиту (табл. 15.6).

Таблица 15.5

**Предполагаемые величины долей масс Mn (% к массе Mn в данной горной породе), сконцентрированные в марганцевых минералах осадочных пород континентальной коры**

| Минералы    | Пески, песчаники             | Глины, сланцы                | Карбонатные породы         | Кремнистые породы          | Во всех породах              |
|-------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Мп-кальцит  | 0.07 (0.0006)                | 0.15 (0.0019)                | 0.34 (0.0041)              | 0.21 (0.0037)              | 0.17 (0.002)                 |
| Кутнагорит  | 0.22 ( $5.5 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.54 (0.0018)                | 0.43 (0.0014)              | 1.13 (0.0052)              | 0.46 (0.0014)                |
| Родохрозит  | 0.36 ( $5.2 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.96 (0.0019)                | 0.36 (0.0007)              | 3.56 (0.0098)              | 0.76 (0.0014)                |
| Криптомелан | 0.07 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.21 ( $4.1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.02 ( $4 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.35 ( $9 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.15 ( $2.6 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Вернадит    | 0.01 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.12 ( $2 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.04 ( $6 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.34 ( $8 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.08 ( $1.3 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Псиломелан  | 0.42 (0.0005)                | 0.93 (0.0015)                | 0.06 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 3.56 (0.008)               | 0.73 (0.0011)                |
| Тодорокит   | 0.44 (0.0005)                | 0.33 (0.0005)                | 0.05 ( $7 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.85 (0.0018)              | 0.31 ( $4.3 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Манганит    | 0.2 (0.0002)                 | 0.76 (0.001)                 | 0.08 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 5.42 (0.01)                | 0.62 ( $7.6 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Пирролюзит  | 0.55 ( $5.3 \cdot 10^{-4}$ ) | 1.743 (0.0023)               | 0.16 (0.0002)              | 6.58 (0.012)               | 1.31 (0.0016)                |
| Сумма       | 2.34 (0.003)                 | 5.74 (0.0115)                | 1.54 (0.0068)              | 22 (0.0522)                | 4.59 (0.0091)                |

Примечание. Здесь и в табл. 15.6 в скобках – содержание минералов, %.

Таблица 15.6

**Предполагаемые величины долей масс Mn (% к массе Mn в данной горной породе), сконцентрированные в максиминералах параметаморфических пород континентальной коры**

| Минералы    | Метапесчаники               | Парасланцы                   | Метакарбонаты                | Во всех породах              |
|-------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Мп-кальцит  | 0.12 (0.0016)               | 0.08 (0.0012)                | 0.06 (0.0013)                | 0.08 (0.0012)                |
| Якобсит     | 0.19 (0.0009)               | 0.16 (0.0009)                | 0.01 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.16 ( $8.6 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Спессартин  | 2.18 (0.0087)               | 1.65 (0.0075)                | 0.13 ( $7.5 \cdot 10^{-4}$ ) | 1.61 (0.0073)                |
| Кутнагорит  | 0.69 (0.0025)               | 0.56 (0.0023)                | 0.18 (0.001)                 | 0.55 (0.0022)                |
| Родонит     | 0.34 (0.001)                | 0.3 (0.001)                  | 0.02 (0.0001)                | 0.28 ( $9.6 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Родохрозит  | 1.25 (0.0027)               | 1.1 (0.0027)                 | 0.31 (0.001)                 | 1.07 (0.0026)                |
| Криптомелан | 0.3 (0.0006)                | 0.26 (0.0006)                | 0.02 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.25 ( $5.8 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Псиломелан  | 0.1 ( $1.7 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.15 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.02 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.14 ( $2.8 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Голландит   | 2.23 (0.0039)               | 0.85 (0.0017)                | 0.23 (0.0006)                | 0.91 (0.0018)                |
| Браунит     | 4.74 (0.008)                | 4.17 (0.008)                 | 0.39 (0.001)                 | 4.01 (0.0077)                |
| Тефроит     | 3.48 (0.0056)               | 2.18 (0.004)                 | 0.08 (0.0002)                | 2.17 (0.004)                 |
| Пирролюзит  | 0.28 (0.0004)               | 0.43 ( $7 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.02 ( $5 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.4 ( $6.5 \cdot 10^{-4}$ )  |
| Гаусманит   | 3.31 (0.004)                | 2.18 (0.003)                 | 0.27 ( $5 \cdot 10^{-4}$ )   | 2.18 (0.003)                 |
| Сумма       | 19.21 (0.04)                | 14.07 (0.034)                | 1.74 (0.0066)                | 13.81 (0.033)                |



#### 15.1.4. Обсуждение полученных данных

Полученные данные – первое приближение к пониманию ситуации с Mn в верхней части континентальной коры. Распределение его масс в ассоциации горных пород определено на основе обширного фактического материала. На данной стадии исследований эту часть данных можно считать достаточно корректной, ее уточнение возможно только после разработки более совершенной геохимической модели верхней части континентальной коры. Данные о вариациях концентрации масс Mn в каждой из осадочных и метаморфических пород основаны на меньшем фактическом материале. Существенное их уточнение необходимо, но может быть доступно только исследователям, имеющим первичные результаты геохимического опробования значительных территорий. Данные, характеризующие роль марганцевых минералов как носителей Mn, нуждаются в проверке и детализации. Но это возможно только после получения значительного объема данных о вариациях содержаний марганцевых минералов в важнейших горных породах, представляющих собой верхнюю часть континентальной коры. Пока же отметим, что роль марганцевых минералов в осадочных породах, вероятно, преуменьшена. Особенно это относится к продуктам глубокого выветривания метаморфических пород. Это предположение основано на результатах изучения золотоносных кор выветривания Светлинского месторождения (Григорьев, 1999). Марганцевые минералы не были обнаружены в трех пробах с преобладанием эндогенных минералов и гидрослюд. Содержание Mn в этих пробах 0.1–0.13%, но в двух из них существенно монтмориллонит-каолинитового состава с содержанием Mn всего 0.013 и 0.044% обнаружен пиролюзит, в котором сконцентрировано соответственно 25 и 63% масс Mn. Поэтому автор пока воздержался от далеко идущих выводов относительно соотношения перспективности осадочных и метаморфических пород как возможных источников Mn.

#### 15.1.5. Выводы

Среднее содержание Mn в верхней части континентальной коры 0.077%. Главные его носители осадочные и метаморфические породы, в которых находится 63.73% массы Mn, имеющейся в верхней части континентальной коры. Для каждой из этих пород определено распределение масс Mn по участкам с содержаниями: низким ( $< 0.077\%$ ), повышенным (0.077–0.69%) и высоким ( $> 0.69\%$ ). Распределение масс Mn в разных горных породах по таким участкам соответственно, %: 12.71–53.85; 41.86–57.4; 3.95–29.89. Данных о вариациях содержания марганцевых минералов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры, очень мало. Приблизительный расчет показал, что марганцевые минералы находятся преимущественно в осадочных и метаморфических породах с высоким содержанием Mn. Предполагается, что в верхней части континентальной коры в марганцевых минералах сконцентрировано 7.02% всей массы Mn, в том числе, %: в брауните – 1.8, тефроите – 0.98, гаусманите – 0.93, спессартине – 0.73, родохрозите – 0.63, пиролюзите – 0.43, голландите – 0.41, кутнагорите – 0.31, псиломелане – 0.2, криптомелане – 0.14, мангани-

те – 0.12, родоните – 0.12, Мп-кальците – 0.07, якобите – 0.07, тодорските – 0.06, вернадите – 0.02.

Полученные данные дают основания предполагать, что резерв Мп, сконцентрированного в собственных минералах, значителен даже в геохимическом отношении.

## **15.2. ЖЕЛЕЗО**

### **15.2.1. Среднее содержание и распределение масс Fe в верхней части континентальной коры**

Средние содержания Fe в горных породах здесь даны преимущественно по (Ронов и др., 1990) с небольшими поправками. Вычисленное на этой основе среднее содержание Fe в верхней части континентальной коры 4.06% находится в пределах 3.18–4.49%, опубликованных другими исследователями (Rudnick, Gao, 2004). Приводимые средние содержания Fe в горных породах (см. табл. 15.1) отражают известные закономерности: максимальную концентрацию Fe в железистых породах, значительную – в ультраосновных и основных магматических породах, а также в продуктах их метаморфизма. Среднее содержание Fe в осадочных породах 3.54% почти равно тому (3.34%), которое могло быть унаследовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (расчет изоалюминиевым методом). Главные носители Fe метаморфические породы, в которых находится 67.08 всей массы Fe.

### **15.2.2. Средний минеральный баланс Fe в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах**

В литературе опубликованы многочисленные результаты определений содержаний породообразующих минералов в горных породах, а также результаты более чем 4000 количественных минералогических анализов горных пород, в которых учтены железные сульфиды, оксиды и гидроксиды. Средний минеральный состав горных пород, рассчитанный по опубликованным результатам минералогических анализов, не вполне соответствует их среднему химическому составу. Минеральные балансы Fe, рассчитанные по средним результатам количественных минералогических анализов, преимущественно дефицитные. Пример – граниты. Расчет минерального баланса Fe по данным В.В. Ляховича (1967) о минеральном составе гранитов дает сумму учтенных долей массы Fe 74.84%. Главная причина – преуменьшение содержания акцессорных минералов (в частности железных сульфидов и оксидов) при количественных минералогических анализах (Григорьев, 1999), поэтому средние содержания минералов Fe в горных породах скорректированы при синхронном расчете минеральных балансов главных химических элементов (см. раздел 1.2.1).

Установлено, что в верхней части континентальной коры 92.38% масс Fe сконцентрировано в его собственных минералах. В чужих минералах (миниминералах) рассеяно 5.87% масс Fe (табл. 15.7). Интервал нехарак-

Таблица 15.7

## Средний минеральный баланс Fe в верхней части континентальной коры

| Категории минералов<br>как концентраторов Fe | КК         | Минералы            | Содержание<br>минералов, % | Содержание<br>Fe, % | Доли масс<br>Fe, % |
|----------------------------------------------|------------|---------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| Миниминералы                                 | 0.02–1     | Полевые шпаты       | 38.09                      | 0.1–0.9             | 3.24               |
|                                              |            | Парагонит           | 0.56                       | 1.02                | 0.14               |
|                                              |            | Гидромусковит       | 2.51                       | 2                   | 1.24               |
|                                              |            | Диопсид             | 0.48                       | 2.3                 | 0.27               |
|                                              |            | Монтмориллонит      | 0.43                       | 3.4                 | 0.36               |
|                                              |            | Пеннин              | 0.27                       | 3.92                | 0.26               |
|                                              |            | Прочие              |                            |                     | 0.36               |
|                                              |            | Всего               |                            |                     | 5.87               |
| Кларкминералы                                | 1–5.94     | Бейделлит           | 0.16                       | 4.81                | 0.19               |
|                                              |            | Гидробиотит         | 0.48                       | 4.98                | 0.59               |
|                                              |            | Роговая обманка     | 3.16                       | 6.14                | 4.78               |
|                                              |            | Авгит               | 1.21                       | 6.57                | 1.96               |
|                                              |            | Ставролит           | 0.25                       | 10.05               | 0.64               |
|                                              |            | Клинохлор           | 0.69                       | 12.2                | 2.07               |
|                                              |            | Эпидот              | 1.17                       | 12.4                | 3.57               |
|                                              |            | Рипидолит           | 1.89                       | 12.79               | 5.96               |
|                                              |            | Оливин              | 0.037                      | 12.8                | 0.12               |
|                                              |            | Актинолит           | 0.39                       | 13.64               | 1.31               |
|                                              |            | Гастингсит          | 0.31                       | 15.23               | 1.16               |
|                                              |            | Биотит              | 7.49                       | 16.5                | 30.44              |
|                                              |            | Альмандин           | 0.85                       | 18.7                | 3.92               |
|                                              |            | Куммингтонит        | 0.46                       | 19.75               | 2.24               |
|                                              |            | Лепидомелан         | 0.076                      | 19.8                | 0.37               |
|                                              |            | Эгирин              | 0.09                       | 20.7                | 0.46               |
|                                              |            | Глауконит           | 0.13                       | 20.9                | 0.67               |
|                                              |            | Гиперстен           | 0.43                       | 21.07               | 2.23               |
|                                              |            | Рибекит             | 0.17                       | 24.31               | 1.02               |
|                                              |            | Нонтронит           | 0.57                       | 24.12               | 3.39               |
|                                              |            | Шамозит             | 0.55                       | 24.1                | 3.26               |
|                                              |            | Прочие              |                            |                     | 1.32               |
|                                              |            | Всего               |                            |                     | 71.67              |
| Минералы ИНК*                                | 5.94–8.86  | Mg-сидерит и др.    | 0.0059                     | 30.58               | 0.05               |
| Максиминералы                                | 8.86–17.64 | Тюрингит            | 0.12                       | 36                  | 1.06               |
|                                              |            | Ильменит            | 0.19                       | 37.6                | 1.76               |
|                                              |            | Сидерит             | 0.12                       | 45.7                | 1.35               |
|                                              |            | Пирит               | 0.063                      | 46.5                | 0.72               |
|                                              |            | Марказит            | 0.0012                     | 46.5                | 0.01               |
|                                              |            | Фаялит              | 0.0039                     | 53.99               | 0.05               |
|                                              |            | Ti-магнетит         | 0.066                      | 56.1                | 0.91               |
|                                              |            | Пирротин            | 0.029                      | 61.57               | 0.44               |
|                                              |            | Гетит               | 0.085                      | 62.7                | 1.31               |
|                                              |            | Гематит             | 0.079                      | 69.6                | 1.35               |
|                                              |            | Магнетит            | 0.65                       | 71.6                | 11.5               |
|                                              |            | Всего               |                            |                     | 20.46              |
|                                              |            | Сумма долей масс Fe |                            |                     |                    |

\* ИНК – интервал нехарактерной концентрации.

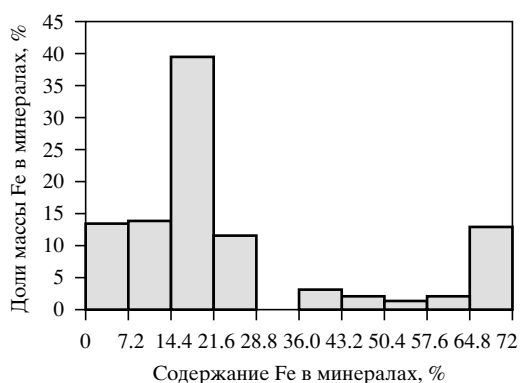


Рис. 5. Распределение масс Fe в верхней части континентальной коры по минералам с разным содержанием Fe

терной концентрации 25–35% Fe (КК 5.94–8.86) делит всю совокупность минералов на две неравные части (см. табл. 15.7, рис. 5). Первая представлена миниминералами и кларкминералами, вторая – максиминералами. Кларкминералы – в основном комплексные соединения Fe с

Mg, Ca, Al, K (преимущественно листовые и цепочечные силикаты). В них слабо сконцентрировано 71.67% массы Fe (30.44% – в биотите). Главные максиминералы – соединения, где катионы представляет только Fe. Это в основном оксиды, сульфиды, гидроксиды, сидерит. Исключения: тюрингит и фаялит. В максиминералах сконцентрировано 20.46% массы Fe (11.5% – в магнетите). К интервалу нехарактерной концентрации относятся Mg-сидерит, халькопирит, плеонаст и др. Роль их в качестве носителей Fe ничтожна (0.05% массы).

В осадочном и гранитно-гнейсовом слоях распределение массы Fe в ассоциации минералов-концентраторов почти аналогичное, но наиболее важные максиминералы в этих слоях разные. В осадочном слое это гетит, в гранитно-гнейсовом слое – магнетит. В осадочном слое породы осадочные (табл. 15.8) и вулканогенные (табл. 15.9) различаются по минеральному ба-

Таблица 15.8

**Распределение масс Fe (%) по минералам в осадочных породах континентальной коры**

| Категории минералов как концентраторов Fe | Минералы    | Пески и песчаники | Глины и сланцы | Карбонатные породы | Кремнистые породы | В целом |
|-------------------------------------------|-------------|-------------------|----------------|--------------------|-------------------|---------|
| Миниминералы                              | Всего       | 11.18             | 11.65          | 9.21               | 5.7               | 11.52   |
| Кларкминералы                             | Гидробиотит | 4.65              | 3.17           | 1.37               | Не опр.           | 3.36    |
|                                           | Рипидолит   | 7.97              | 7.33           | Не опр.            | 4.01              | 7.01    |
|                                           | Биотит      | 15.42             | 17.52          | 15.14              | Не опр.           | 16.64   |
|                                           | Глауконит   | 9.77              | 1.33           | Не опр.            | 38.66             | 3.78    |
|                                           | Нонтронит   | 11.27             | 20.48          | 44.22              | Не опр.           | 19.49   |
|                                           | Шамозит     | 15.02             | 20.47          | 11.06              | 18.89             | 18.65   |
|                                           | Прочие      | 5.86              | 4.46           | 4.88               | 9.35              | 4.82    |
|                                           | Всего       | 69.96             | 74.76          | 76.67              | 70.91             | 73.75   |
| Максиминералы                             | Ильменит    | 2.34              | 0.4            | Не опр.            | 1.53              | 0.85    |
|                                           | Сидерит     | 0.29              | 0.29           | 2.31               | Не опр.           | 0.4     |
|                                           | Пирит       | 0.26              | 1.48           | 0.17               | 0.92              | 1.31    |
|                                           | Марказит    | Не опр.           | 0.05           | Не опр.            | Не опр.           | 0.01    |
|                                           | Гетит       | 11.72             | 5.32           | 11.5               | 19.66             | 7.44    |
|                                           | Гематит     | 0.37              | 1.43           | 0.96               | < 0.01            | 1.16    |
|                                           | Магнетит    | 4.02              | 0.76           | Не опр.            | 0.18              | 1.46    |
|                                           | Всего       | 19                | 9.73           | 14.94              | 22.29             | 12.63   |
| Суммы долей масс                          |             | 100.14            | 96.14          | 100.82             | 98.9              | 97.9    |

Таблица 15.9

**Распределение масс Fe (%) по минералам вулканогенных пород  
осадочного слоя континентальной коры**

| Категории минералов<br>как концентраторов Fe | Минералы        | Кислые  | Средние | Основные | В целом |
|----------------------------------------------|-----------------|---------|---------|----------|---------|
| Миниминералы                                 | Всего           | 8.22    | 6.26    | 3.19     | 4.11    |
| Кларкминералы                                | Роговая обманка | 0.41    | 7.31    | 2.67     | 3.73    |
|                                              | Авгит           | 0.09    | 5.21    | 11.4     | 9.58    |
|                                              | Биотит          | 26.4    | 18      | 14.9     | 16      |
|                                              | Пижонит         | Не опр. | 1.79    | 6.73     | 5.32    |
|                                              | Гиперстен       | 0.14    | 6.28    | 18.3     | 14.9    |
|                                              | Прочие          | 6.34    | 2.99    | 7.72     | 6.52    |
|                                              | Всего           | 33.38   | 41.58   | 61.72    | 56.05   |
| Максиминералы                                | Тюрингит        | 7.2     | 8.55    | 2.68     | 4.24    |
|                                              | Ильменит        | 0.75    | 3.66    | 3.27     | 3.32    |
|                                              | Сидерит         | 22.9    | 8.7     | 6.8      | 7.7     |
|                                              | Пирит           | 1.55    | 0.65    | 0.29     | 0.41    |
|                                              | Ti-магнетит     | 3.74    | 5.57    | 9.74     | 8.48    |
|                                              | Пирротин        | Не опр. | Не опр. | 0.38     | 0.28    |
|                                              | Гематит         | 0.93    | 8.29    | 1.73     | 3.29    |
|                                              | Магнетит        | 16.7    | 11.9    | 5.51     | 7.44    |
|                                              | Всего           | 53.77   | 47.32   | 30.4     | 35.16   |
| Суммы долей масс                             |                 | 95.37   | 95.16   | 95.31    | 95.32   |

Таблица 15.10

**Распределение масс Fe (%) по минералам магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Категории минералов<br>как концентраторов Fe | Минералы        | Граниты | Гранодио-<br>риты | Базиты  | Сиениты | Ультра-<br>базиты | В целом |
|----------------------------------------------|-----------------|---------|-------------------|---------|---------|-------------------|---------|
| Миниминералы                                 | Всего           | 8.07    | 9.06              | 5.03    | 7.32    | 4.94              | 7.03    |
| Кларкминералы                                | Роговая обманка | 1.68    | 5.58              | 4.84    | 0.93    | 2.36              | 3.8     |
|                                              | Авгит           | 0.36    | 2.99              | 6.53    | 16.87   | Не опр.           | 3.12    |
|                                              | Бронзит         | Не опр. | Не опр.           | 2.97    | Не опр. | 13.2              | 1.12    |
|                                              | Рипидолит       | 1.05    | 6.59              | 11.3    | Не опр. | Не опр.           | 5.86    |
|                                              | Оливин          | Не опр. | Не опр.           | 0.31    | 0.04    | 14.8              | 0.29    |
|                                              | Биотит          | 43.3    | 43.75             | 10.6    | 7.48    | Не опр.           | 32.4    |
|                                              | Эгирин          | Не опр. | Не опр.           | 3.76    | 37.52   | Не опр.           | 1.32    |
|                                              | Гиперстен       | 0.23    | 0.64              | 6.39    | Не опр. | Не опр.           | 2.27    |
|                                              | Прочие          | 1.26    | 0.91              | 3.4     | 10.36   | 8.85              | 1.35    |
|                                              | Всего           | 47.88   | 60.46             | 50.1    | 73.2    | 39.21             | 51.53   |
| Минералы ИНК<br>Максиминералы                | Всего           | < 0.01  | < 0.01            | < 0.01  | < 0.01  | 0.06              | < 0.01  |
|                                              | Ильменит        | 4.93    | 5.7               | 2.28    | 4.54    | 0.25              | 4.3     |
|                                              | Сидерит         | < 0.01  | 0.28              | 1.11    | Не опр. | 0.13              | 0.43    |
|                                              | Пирит           | 0.51    | 0.28              | 0.28    | 0.14    | 0.45              | 0.38    |
|                                              | Марказит        | 0.01    | 0.09              | Не опр. | 0.01    | Не опр.           | 0.03    |
|                                              | Ti-магнетит     | < 0.01  | Не опр.           | 13.6    | 0.22    | 8.09              | 4.34    |
|                                              | Пирротин        | 0.2     | 0.26              | 0.11    | 0.44    | Не опр.           | 0.2     |
|                                              | Гетит           | 0.22    | 0.06              | Не опр. | Не опр. | Не опр.           | 0.1     |
|                                              | Гематит         | 0.38    | 0.63              | 2.53    | < 0.01  | Не опр.           | 1.12    |
|                                              | Магнетит        | 33.3    | 20.61             | 23.4    | 9.3     | 44.1              | 26.8    |
|                                              | Всего           | 39.55   | 27.91             | 43.31   | 14.65   | 53.02             | 37.7    |
| Суммы долей масс                             |                 | 95.5    | 97.43             | 98.44   | 95.17   | 97.23             | 96.26   |

Таблица 15.11

## Распределение масс Fe (%) по минералам параметаморфических пород

| Категории минералов как концентраторов Fe | Минералы        | Метапесчанники | Парасланцы | Карбонатные породы | Железистые породы | В целом |
|-------------------------------------------|-----------------|----------------|------------|--------------------|-------------------|---------|
| Миниминералы                              | Всего           | 3.82           | 4.66       | 13.41              | 0.31              | 4.53    |
| Кларкминералы                             | Роговая обманка | 6.19           | 7.94       | 3.15               | 0.66              | 7.34    |
|                                           | Клинохлор       | 7.03           | 4.7        | 2.35               | Не опр.           | 4.55    |
|                                           | Эпидот          | 6.43           | 7.03       | 0.8                | 0.05              | 6.52    |
|                                           | Оливин          | Не опр.        | Не опр.    | 12.31              | Не опр.           | 0.14    |
|                                           | Рипидолит       | 6.27           | 4.06       | 9.03               | 1.11              | 4.08    |
|                                           | Биотит          | 30.91          | 33.67      | 15.87              | 0.34              | 31.4    |
|                                           | Альмандин       | 8.08           | 6.36       | 0.84               | 3.87              | 6.26    |
|                                           | Прочие          | 5.31           | 10.96      | 10.18              | 9.71              | 10.55   |
|                                           | Всего           | 70.22          | 74.72      | 54.53              | 15.74             | 70.84   |
| Минералы ИНК                              | Mg-сидерит      | Не опр.        | Не опр.    | 9.8                | 0.13              | 0.12    |
| Максиминералы                             | Тюрингит        | Не опр.        | 0.51       | Не опр.            | 0.59              | 0.38    |
|                                           | Ильменит        | 2.38           | 1.28       | Не опр.            | Не опр.           | 1.27    |
|                                           | Сидерит         | 0.92           | 1.04       | 8.79               | 2.65              | 1.23    |
|                                           | Пирит           | 0.67           | 0.84       | 1.49               | 0.14              | 0.79    |
|                                           | Фаялит          | Не опр.        | Не опр.    | Не опр.            | 2.24              | 0.13    |
|                                           | Гетит           | 0.72           | Не опр.    | Не опр.            | 0.52              | 0.08    |
|                                           | Пирротин        | 0.18           | 0.98       | 4.34               | Не опр.           | 0.91    |
|                                           | Гематит         | 2.21           | 1.26       | 1.34               | 12.69             | 2       |
|                                           | Магнетит        | 15.06          | 12.99      | 3.67               | 65.25             | 16.1    |
|                                           | Всего           | 22.14          | 18.9       | 19.63              | 84.08             | 22.89   |
| Суммы долей масс                          |                 | 96.18          | 98.29      | 97.37              | 100.27            | 98.38   |

Таблица 15.12

## Распределение масс Fe (%) по минералам ортометаморфических пород

| Категории минералов как концентраторов Fe | Минералы-носители Fe | Гранито-гнейсы | Метариолиты  | Метаандезиты | Метабазиты   | Ортометаморфиты |
|-------------------------------------------|----------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| Миниминералы                              | <b>Всего</b>         | <b>4.93</b>    | <b>5.19</b>  | <b>5.26</b>  | <b>3.12</b>  | <b>4.67</b>     |
| Кларкминералы                             | Роговая обманка      | 3.63           | 2.03         | 5.48         | 6.08         | 4.25            |
|                                           | Авгит                | 1.85           | 0.87         | 1.83         | 7.32         | 3.09            |
|                                           | Эпидот               | 0.35           | 10.7         | 5.3          | 10.7         | 3.12            |
|                                           | Рипидолит            | 10.1           | 8.48         | 8.57         | 6.02         | 9.08            |
|                                           | Актинолит            | Не опр.        | 2.26         | 5.07         | 8.44         | 2.21            |
|                                           | Биотит               | 53.5           | 13.7         | 8.59         | 11.8         | 40.2            |
|                                           | Альмандин            | 6.85           | 3.1          | 0.35         | 1.16         | 5.16            |
|                                           | Куммингтонит         | Не опр.        | Не опр.      | 7.34         | 14.2         | 3.59            |
|                                           | Гиперстен            | 1.78           | 0.7          | 2.75         | 8.62         | 3.37            |
|                                           | Прочие               | 5.73           | 0.5          | 2.85         | 11.2         | 7.71            |
|                                           | <b>Всего</b>         | <b>83.79</b>   | <b>42.34</b> | <b>48.13</b> | <b>85.54</b> | <b>81.78</b>    |
| Максиминералы                             | Тюрингит             | Не опр.        | 32.12        | 33.43        | Не опр.      | 2.17            |
|                                           | Ильменит             | 1.59           | 2.86         | 2.8          | 2.09         | 1.78            |
|                                           | Сидерит              | Не опр.        | 1.51         | 6.12         | 3.11         | 1.03            |
|                                           | Пирит                | 0.52           | 0.52         | 0.26         | 0.35         | 0.47            |
|                                           | Марказит             | Не опр.        | 0.15         | Не опр.      | 0.06         | 0.02            |
|                                           | Гетит                | 0.05           | Не опр.      | Не опр.      | < 0.01       | 0.03            |
|                                           | Пирротин             | 0.17           | 0.06         | 0.11         | 0.23         | 0.19            |
|                                           | Гематит              | 0.01           | 2.3          | Не опр.      | 1.03         | 0.29            |
|                                           | Магнетит             | 8.47           | 8.3          | 3.33         | 3.1          | 6.93            |
|                                           | <b>Всего</b>         | <b>10.81</b>   | <b>47.82</b> | <b>46.05</b> | <b>9.97</b>  | <b>12.91</b>    |
| Суммы долей масс                          |                      | 99.53          | 95.35        | 99.44        | 98.63        | 99.36           |

лансу Fe. В осадочных породах роль максиминералов относительно мала, только в песках, песчаниках и кремнистых породах она близка к средней. В вулканогенных по расчету она оказалась неожиданно большой. В этом отношении вулканиты похожи на интрузивные породы. Роль максиминералов в магматических породах (табл. 15.10) повышенная. Заметим, что А.Б. Роновым с соавторами (1990) в состав ультрабазитов включены продукты их метаморфизма. Это положение сохранено и здесь. Средние минеральные балансы Fe в параметаморфических породах (табл. 15.11) варьируют. Доли масс Fe, сконцентрированные в максиминералах в парасланцах, – 18.9%, в железистых породах – 84.08%. Во всех породах, кроме карбонатных, главный максиминерал магнетит. В карбонатных породах слабо выражен интервал нехарактерной концентрации из-за высокого содержания Mg-сидерита. Здесь главный максиминерал сидерит. Вариации роли максиминералов как носителей масс Fe в ортометаморфических породах (табл. 15.12) меньше, чем в параметаморфических породах, но тоже существенны. В гранито-гнейсах в максиминералах сконцентрировано всего 10.81% масс Fe (8.47% в магнетите). В метавулканитах роль максиминералов увеличивается от основных к кислым.

### 15.2.3. Обсуждение имеющихся данных

Распределение масс Fe в ассоциации горных пород, представляющей верхнюю часть континентальной коры, определено на основе общепризнанных данных А.Б. Ронova и других исследователей. Пока эту часть данных можно считать достаточно корректной. Данные о вариациях минерального состава горных пород многочисленны, но корректность имеющихся здесь сведений о вариациях содержания максиминералов Fe оставляет желать лучшего. Минеральные балансы Fe, рассчитанные по средним результатам количественных минералогических анализов, преимущественно дефицитны. Это одна из причин проведенной корректировки среднего минерального состава горных пород, как правило, в сторону увеличения содержания максиминералов Fe. Таким образом, данные о средних минеральных балансах Fe в горных породах – это лишь первое приближение к истине. Желательно их уточнение. Особенно это относится к средним минеральным балансам Fe в метариолитах и метаандезитах. Данные о большой роли максиминералов в качестве носителей Fe в метариолитах и метаандезитах требуют проверки. Большая, по результатам расчетов, роль железистых хлоритов здесь, возможно, обусловлена спецификой исходных данных. В исследованных пробах значительная часть биотита оказалась замещена железистыми хлоритами, учтенными как тюрингит. Однако пока этот вопрос не относится к наиболее актуальным.

Возможности сопоставления полученных данных с результатами определения минеральных балансов Fe в конкретных пробах горных пород крайне ограничены. Наборы данных, достаточные для корректного определения минеральных балансов Fe в конкретных пробах горных пород преимущественно эпизодические, малочисленны и неполны. Сводка имеющихся сведений и результатов расчетов на их основе была дана раньше (Григо-

рьев, 1999). В целом видно, что решающее влияние на максиминералы как носителей Fe оказывают состав и генезис горных пород. Влияние валового содержания Fe прослеживается только в ассоциациях горных пород, близких по генезису и минеральному составу. Наиболее изучены железистые породы, ультрабазиты (включая продукты их метаморфизма) и metabазиты (Григорьев, 1999). В железистых породах при валовом содержании Fe 20.2–25.7% в магнетите и гематите сконцентрировано 47–92% его масс. При валовом содержании Fe 37.1–41.3% доли его масс, сконцентрированные в максиминералах, 85–100%, т. е. приведенные выше средние данные для железистых пород соответствуют результатам изучения проб со средним валовым содержанием Fe. В пироксенитах при валовом содержании Fe 7.3–15.1% в магнетите (Ti-магнетите) и ильмените сконцентрировано 26–64% его масс, при валовом содержании Fe 27.9–49.94% его доля, сконцентрированная в максиминералах 76–90%. В серпентините и продуктах его лиственитизации при валовом содержании Fe 3.61–6.03% в магнетите и хромшпинелидах сконцентрировано 44–88% его масс. Прочие данные некорректны (не учтены оксиды и сульфиды Fe). Таким образом, и по ультрабазитам наши данные соответствуют результатам изучения проб с валовым содержанием Fe, близким к среднему. В горнблендитах и метадиабазах (включая продукты лиственитизации) при валовом содержании Fe 7.81–10.72% в максиминералах сконцентрировано 4–33% его масс. При валовом содержании Fe 17.5–44.5% эти доли увеличиваются до 35.3–86%. Таким образом, и по metabазитам наши данные тоже соответствуют результатам изучения проб с валовым содержанием Fe, близким к среднему.

#### **15.2.4. Выводы**

Среднее содержание Fe в верхней части континентальной коры 4.06%. Больше половины масс Fe (67.08%) сосредоточено в метаморфических породах гранитно-гнейсового слоя. Согласно имеющимся данным, в максиминералах сконцентрировано 20.46% масс Fe, в том числе в магнетите 11.5, ильмените – 1.76, гематите – 1.35, сидерите – 1.35, гетите – 1.31, тюрингите – 1.06, Ti-магнетите – 0.91, пирите – 0.72, пирротине – 0.44, фаялите – 0.05, марказите – 0.01.

#### **15.3. КОБАЛЬТ**

##### **15.3.1. Среднее содержание и распределение масс Co в верхней части континентальной коры**

Приводимые здесь средние содержания Co в горных породах (см. табл. 15.1) соответствуют опубликованным ранее (Григорьев, 2003б). Соответствующее им среднее содержание Co в верхней части континентальной коры 0.0017% находится в пределах данных (0.0012–0.0018%), опубликованных другими исследователями (Rudnick, Gao, 2004). Вариации средних содержаний Co в горных породах подтверждают известную закономерность:



его среднее содержание максимально в ультраосновных и основных магматических породах, а также в продуктах их метаморфизма. В верхней части континентальной коры распределение Со практически соответствует требованиям геохимического баланса. Его среднее содержание в осадочных породах 0.014% соответствует тому, которое могло быть заимствовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (0.014% – по определению изоалюминиевым методом). Главные носители Со метаморфические породы. В них сосредоточено 71.47% его масс.

### **15.3.2. Доли масс Со, сконцентрированные в максиминералах**

Содержание Со минимальное для максиминералов – 0.3% (Григорьев, 1999). К максиминералам относятся все собственные минералы Со и некоторые чужие, в частности марганцевые. В псиломелане и голландите среднее содержание Со > 0.3%. Поэтому они рассматриваются здесь как максиминералы в масштабах верхней части континентальной коры. Способ определения содержаний псиломелана и голландита в горных породах охарактеризован в разделе 15.1.3. Средние содержания в горных породах остальных упомянутых ниже максиминералов рассчитаны по опубликованным в литературе результатам количественных минералогических анализов горных пород (более 2160 проб). При количественных минералогических анализах максиминералы Со в большинстве проб не были отмечены. При расчетах предполагалось, что их там не было. Главные первоисточники данных перечислены раньше, в частности в разделе 13.2.2. Ниже приведены только наиболее важные объекты, где отмечены максиминералы Со и Ni. Палеозойские песчаники Центрального Таджикистана (Бабкин, 1986); юрские и плиоценовые песчано-глинистые отложения Курской магнитной аномалии (Кузнецов, 1992); кайнозойские липариты, трахилипариты, трахибазальты, трахидиабазы Северного Кавказа и северо-востока СССР (Бартияян, 1968; Ипатьева, Соловьев, 1982; Ляхович, 1963; Ляхович, Червинская, 1961); триасовые палагонитовые траппы Сибири (Наумов, Гурин, 1967); гранитоиды СССР включая сиениты (Винокурова и др., 1982; Ипатьева, 1976; Ляхович, 1967; Недашковский, 1982; Тихоненкова, 1982; Туровский, Кокарев, 1968); габброиды СССР (Кромская, 1973; Недашковский, 1982; Чернышов, 1971; Чернышов, Плаксенко, 1982); ультрабазиты Воронежского кристаллического массива (Чернышов, 1971; Чернышов, Плаксенко, 1982); метапесчаник из Тувы (Ляхович, 1966); докембрийские кварциты Киргизского хребта (Кокарев и др., 1986); кристаллические парасланцы Украинского щита (Носырев и др., 1986); метасоматиты по парасланцам (Кромская, 1973); гранито-гнейс Мурзинского массива (Ляхович, 1967); метавулканиды (амфиболиты) Украинского щита (Носырев и др., 1986) и Северного Кавказа (Кременецкий, Овчинников, 1986).

По расчету доли массы Со, сконцентрированные в максиминералах, %: в верхней части континентальной коры – 0.28, осадочном слое – 0.17, гранитно-гнейсовом слое – 0.29 (табл. 15.13). Главная роль в качестве носителей Со принадлежит марганцевым минералам осадочных и параметаморфических пород. В осадочных породах существенные доли масс Со скон-

Таблица 15.13

## Роль максиминералов как носителей Со в верхней части континентальной коры

| Минералы     | Содержание Со в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Со, % | Содержание минералов, % | Доли масс Со, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Со, % |
| Псиломелан   | 0.3                          | $9 \cdot 10^{-4}$       | 0.17            | $1.3 \cdot 10^{-4}$     | 0.02            | $3.1 \cdot 10^{-4}$                | 0.05            |
| Голландит    | 0.36                         | Не опр.                 | Не опр.         | $8.4 \cdot 10^{-4}$     | 0.17            | $6.4 \cdot 10^{-4}$                | 0.14            |
| Пентландит   | 0.95                         | $9 \cdot 10^{-7}$       | < 0.01          | $1.1 \cdot 10^{-4}$     | 0.06            | $8.4 \cdot 10^{-5}$                | 0.05            |
| Лёллингит    | 1.2                          | Не опр.                 | Не опр.         | $6.6 \cdot 10^{-10}$    | < 0.01          | $5 \cdot 10^{-10}$                 | < 0.01          |
| Никелин      | 1.26                         | Не опр.                 | Не опр.         | $6.7 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $5.1 \cdot 10^{-6}$                | < 0.01          |
| Блеклые руды | 1.5                          | $5.6 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01          | $1.1 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $9.6 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01          |
| Герсдорфит   | 1.7                          | Не опр.                 | Не опр.         | $4 \cdot 10^{-6}$       | < 0.01          | $3 \cdot 10^{-6}$                  | < 0.01          |
| Виоларит     | 1.8                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.01            | $7.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.01            |
| Арсенопирит  | 2.1                          | $1.9 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $1.1 \cdot 10^{-5}$     | 0.01            | $8.8 \cdot 10^{-6}$                | 0.01            |
| Кобальтин    | 31.4                         | Не опр.                 | Не опр.         | $1.1 \cdot 10^{-6}$     | 0.02            | $8.4 \cdot 10^{-7}$                | 0.02            |
| Всего        |                              | $9.3 \cdot 10^{-4}$     | 0.17            | $7.7 \cdot 10^{-4}$     | 0.29            | $8.1 \cdot 10^{-4}$                | 0.28            |

Таблица 15.14

## Доли масс Со, сконцентрированные в максиминералах осадочных и вулканогенных пород осадочного слоя континентальной коры (% от масс, имеющих в горных породах)

| Горные породы                   | Псиломелан                 | Пентландит                                   | Арсенопирит                                     | Всего                                        |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Пески и песчаники               | 0.12 ( $5 \cdot 10^{-4}$ ) | Не опр.                                      | < 0.01 ( $3 \cdot 10^{-7}$ )                    | 0.12 ( $5 \cdot 10^{-4}$ )                   |
| Глины и глинистые сланцы        | 0.24 (0.0015)              | Не опр.                                      | Не опр.                                         | 0.24 (0.0015)                                |
| Карбонатные породы              | 0.06 ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | Не опр.                                      | Не опр.                                         | 0.06 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )                   |
| Кремнистые породы               | 18.46 (0.008)              | Не опр.                                      | Не опр.                                         | 18.46 (0.008)                                |
| <b>Осадочные породы в целом</b> | <b>0.23 (0.0011)</b>       | <b>Не опр.</b>                               | <b>&lt; 0.01 (<math>8 \cdot 10^{-8}</math>)</b> | <b>0.23 (0.0011)</b>                         |
| Вулканиды кислые                | Не опр.                    | Не опр.                                      | 0.44 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )                      | 0.44 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )                   |
| Вулканиды средние               | Не опр.                    | Не опр.                                      | < 0.01 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )                    | < 0.01 ( $1 \cdot 10^{-6}$ )                 |
| Вулканиды основные              | Не опр.                    | 0.03 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )                   | Не опр.                                         | 0.03 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )                   |
| <b>Вулканиды в целом</b>        | <b>Не опр.</b>             | <b>0.02 (<math>5.7 \cdot 10^{-5}</math>)</b> | <b>0.01 (<math>1.2 \cdot 10^{-5}</math>)</b>    | <b>0.03 (<math>6.9 \cdot 10^{-5}</math>)</b> |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %.

центрированы в псиломелане (табл. 15.14). Согласно имеющимся данным, роль приломелана как носителя Со максимальная в кремнистых породах, но обусловлено это в основном минимальным валовым содержанием Со. В песках обнаружен арсенопирит, в котором сконцентрировано < 0.01% массы Со. В вулканитах осадочного слоя в максиминералах сконцентрировано 0.03% массы Со (см. табл. 15.14). В магматических породах гранитно-гнейсового слоя роль максиминералов повышенная, особенно в гранитах (табл. 15.15). Последнее, отчасти, результат малого валового содержания Со в гранитах и максимальной изученности этих горных пород. Кроме минералов, отмеченных в табл. 15.15, установлены: в гранитах и grano-

Таблица 15.15

**Доли масс Со (% к его массе в породе), сконцентрированные  
в максиминералах магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы    | Граниты                         | Гранодиориты                  | Базиты                          | Сиениты                       | Ультрабазиты                    | В целом                           |
|-------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Псиломелан  | 0.04<br>( $1.2 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                       | Не опр.                         | Не опр.                       | Не опр.                         | < 0.01<br>( $7.5 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Пентландит  | Не опр.                         | Не опр.                       | 0.79<br>(0.004)                 | Не опр.                       | 0.02<br>( $3 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.44<br>( $4 \cdot 10^{-4}$ )     |
| Арсенопирит | 1.18<br>( $5.6 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.11<br>( $4 \cdot 10^{-5}$ ) | < 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.03<br>( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | < 0.01<br>( $6 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.11<br>( $4.5 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Кобальтин   | 3.14<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                       | < 0.01<br>( $4 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                       | Не опр.                         | 0.23<br>( $6.3 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Всего       | 4.36<br>( $7.8 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.11<br>( $4 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.79<br>(0.004)                 | 0.03<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.02<br>( $3 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.78<br>( $4.5 \cdot 10^{-4}$ )   |

Таблица 15.16

**Доли масс Со (% к его массе в породе), сконцентрированные  
в максиминералах параметаморфических пород**

| Минералы    | Метапесчаники                | Парасланцы                   | Метакarbonаты              | В целом                      |
|-------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Псиломелан  | 0.03 ( $1.7 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.05 ( $2.9 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.21 ( $5 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.05 ( $2.8 \cdot 10^{-4}$ ) |
| Голландит   | 0.88 (0.0039)                | 0.32 (0.0017)                | 0.31 (0.0006)              | 0.36 (0.0018)                |
| Пентландит  | Не опр.                      | 0.05 ( $1 \cdot 10^{-4}$ )   | Не опр.                    | 0.05 ( $8.7 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Никелин     | Не опр.                      | 0.01 ( $1.6 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | 0.01 ( $1.4 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Герсдорфит  | Не опр.                      | 0.01 ( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                    | 0.01 ( $9 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Виоларит    | Не опр.                      | 0.02 ( $2.5 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                    | 0.02 ( $2.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Арсенопирит | 0.01 ( $5 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                      | Не опр.                    | < 0.01 ( $4 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Всего       | 0.92 (0.0041)                | 0.46 (0.0021)                | 0.52 (0.0011)              | 0.5 (0.0022)                 |

Таблица 15.17

**Доли масс Со (% к его массе в породе), сконцентрированные  
в максиминералах оротметаморфических пород**

| Минералы    | Гранито-гнейсы               | Метаандезиты               | Метабазиты                 | В целом                        |
|-------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Никелин     | < 0.01 ( $1 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                    | Не опр.                    | < 0.01 ( $8.2 \cdot 10^{-7}$ ) |
| Арсенопирит | < 0.01 ( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.06 ( $5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.01 ( $2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.01 ( $7.5 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Всего       | < 0.01 ( $5 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.06 ( $5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.01 ( $2 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.01 ( $8.3 \cdot 10^{-6}$ )   |

диоритах – блеклые руды, а в сиенитах – лёллингит, но в них сконцентрировано < 0.01% масс Со. В параметаморфических породах ситуация близка к имеющейся в верхней части континентальной коры в целом. Главный максиминерал голландит (табл. 15.16). В оротметаморфических породах, по имеющимся данным, заметной является только роль арсенопирита (табл. 15.17).

### 15.3.3. Обсуждение полученных данных

Среднее содержание Со в горных породах и распределение его массы в ассоциации горных пород определено на основе обширного фактического материала. На данной стадии исследований эту часть данных можно считать достаточно корректной. Данные о максиминералах как носителях Со – это только первое приближение к пониманию ситуации. Согласно полученным данным, главную роль здесь играют марганцевые минералы, но вероятные средние содержания марганцевых минералов в горных породах определены косвенным путем. Они нуждаются в проверке и детализации эмпирическим путем, что возможно только после разработки методики учета марганцевых оксидов и гидроксидов при количественных минералогических анализах. Пока же отметим, что в осадочных породах роль марганцевых минералов как носителей Со, вероятно, преуменьшена.

Возможности сопоставления результатов выполненных расчетов с минеральными балансами Со в конкретных пробах горных пород ограничены. В уральских гранитоидах (Бушляков, Соболев, 1976) и ультрабазитах Восточного Саяна (Сутурин и др., 1974; Сутурин, 1978) Со установлен только в породообразующих минералах. Но суммы учтенных долей масс Со 62.5–87%. В оливиновом норите южно-калифорнийского батолита с валовым содержанием Со 0.0055% последний полностью сосредоточен в темноцветных породообразующих минералах, магнетите и шпинели. Максиминералы не установлены (Sen et al., 1959). Полные минеральные балансы определены для габброидов и метасоматитов Бельтауского массива в Западном Узбекистане (Кромская, 1973), в метасоматитах медно- и железоскарновых месторождений Турьинской группы и золотоносных корях выветривания Светлинского месторождения на Урале (Григорьев, 1999). По этим данным видна прямая зависимость суммарных долей масс Со, сконцентрированных в максиминералах, от его валового содержания в пробах. В интервалах валовых содержаний Со, %: 0.0005–0.005; 0.005–0.05 и 0.05–0.5 доли его масс, сконцентрированные в максиминералах, соответственно равны 0–21, 28–86 и 82–95%.

### 15.3.4. Выводы

Среднее содержание Со в верхней части континентальной коры 0.0017%. Главные носители Со метаморфические породы, в которых сосредоточено 71.47% его масс.

В максиминералах сконцентрировано 0.28% масс Со, в том числе, %: в голландите – 0.14, псиломелане – 0.05, пентландите – 0.05, кобальтине – 0.02, арсенопирите – 0.01, виоларите – 0.01. Эти цифры минимально возможные, они нуждаются в детализации и уточнении, но коррективы возможны только после специальных исследований.

## 15.4. НИКЕЛЬ

### 15.4.1. Среднее содержание и распределение масс Ni в верхней части континентальной коры

Средние содержания Ni в горных породах (см. табл. 15.1) преимущественно соответствуют опубликованным раньше (Григорьев, 2003б). Некоторые цифры исправлены. Наиболее важные данные, учтенные дополнительно: по осадочным породам (Маслов и др., 2004; Di Leo et al., 2002; Götze, 1998; Huber et al., 2001); по докембрийским парагнейсам, кристаллическим парасланцам и параамфиболитам Ингуло-Ингулецкой серии Украинского щита (Резников, Ишевская, 1972), зоны Колмозеро-Воронья на Кольском полуострове (Белолипецкий и др., 1972), Харагольской свиты Южного Прибайкалья (Резницкий и др., 2004). Рассчитанное с учетом поправок среднее содержание Ni в верхней части континентальной коры 0.005%. Оно находится в пределах значений 0.0019–0.006%, публиковавшихся другими исследователями (Rudnick, Gao, 2004). Вариации средних содержаний Ni в горных породах подтверждают известную закономерность: среднее содержание Ni максимальное в ультраосновных и основных магматических породах, а также в продуктах их метаморфизма. Среднее содержание Ni в осадочных породах 0.0038% близко к тому, которое могло быть заимствовано при выветривании гранитно-гнейсового слоя современного состава (0.0031% – по определению изоалюминиевым методом). Главные носители Ni метаморфические породы. В них сосредоточено 71.75% всей массы Ni.

### 15.4.2. Доли масс Ni, сконцентрированные в максиминералах

Преобладающее мнение о том, что в горных породах Ni сосредоточен в силикатах Fe и Mg и отчасти в сульфидах (Vogt, 1923; Санделл, Гольдич, 1952), не вполне верное. В гранитоидах лишь до половины масс Ni слабо сконцентрировано в биотите, амфиболах и пироксенах. К главным носителям Ni относятся полевые шпаты (Нокколдс, Митчелл, 1952; Бушляков, Соболев, 1976; Серых, 1994). Содержание Ni минимальное для максиминералов – 0.7% (Григорьев, 1999). К максиминералам относятся все собственные минералы и некоторые чужие. Средние содержания главных максиминералов в горных породах рассчитаны по результатам количественных минералогических анализов более чем 2160 проб. Главные первоисточники данных отмечены в разделе 13.2.2. В большинстве проб максиминералы Ni не отмечены. При расчетах предполагалось, что их там не было. Наиболее важные объекты, где отмечены максиминералы Co и Ni, перечислены в разделе 15.3.2.

По расчету доли масс Ni, сконцентрированные в максиминералах, %: в верхней части континентальной коры – 0.88, в осадочном слое – 0.01, в гранитно-гнейсовом слое – 1.09 (табл. 15.18). Минимальная роль максиминералов в осадочном слое обусловлена преимущественно наличием пентландита в основных вулканогенных породах (табл. 15.19). В магматических породах гранитно-гнейсового слоя доля масс Ni, сконцентрированная в максими-

Таблица 15.18

**Роль максиминералов как носителей Ni в верхней части континентальной коры**

| Минералы     | Содержание Ni в минералах, % | Осадочный слой          |                 | Гранитно-гнейсовый слой |                 | Верхняя часть континентальной коры |                 |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              |                              | Содержание минералов, % | Доли масс Ni, % | Содержание минералов, % | Доли масс Ni, % | Содержание минералов, %            | Доли масс Ni, % |
| Арсенопирит  | 0.7                          | $1.9 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $1.1 \cdot 10^{-5}$     | < 0.01          | $8.8 \cdot 10^{-6}$                | < 0.01          |
| Блеклые руды | 1.2                          | $5.6 \cdot 10^{-8}$     | < 0.01          | $1.1 \cdot 10^{-7}$     | < 0.01          | $9.6 \cdot 10^{-8}$                | < 0.01          |
| Кобальтин    | 1.4                          | Не опр.                 | Не опр.         | $1.1 \cdot 10^{-6}$     | < 0.01          | $8.4 \cdot 10^{-7}$                | < 0.01          |
| Герсдорфит   | 30.4                         | Не опр.                 | Не опр.         | $4 \cdot 10^{-6}$       | 0.02            | $3 \cdot 10^{-6}$                  | 0.02            |
| Пентландит   | 34.5                         | $9 \cdot 10^{-7}$       | 0.01            | $1.1 \cdot 10^{-4}$     | 0.73            | $8.4 \cdot 10^{-5}$                | 0.58            |
| Виоларит     | 38.7                         | Не опр.                 | Не опр.         | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.07            | $7.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.06            |
| Гарньерит    | 41                           | Не опр.                 | Не опр.         | $1.7 \cdot 10^{-5}$     | 0.13            | $1.3 \cdot 10^{-5}$                | 0.11            |
| Никелин      | 42.6                         | Не опр.                 | Не опр.         | $6.7 \cdot 10^{-6}$     | 0.05            | $5.1 \cdot 10^{-6}$                | 0.04            |
| Ваэсит       | 47                           | Не опр.                 | Не опр.         | $1 \cdot 10^{-5}$       | 0.09            | $7.6 \cdot 10^{-6}$                | 0.07            |
| Всего        |                              | $2.8 \cdot 10^{-6}$     | 0.01            | $1.6 \cdot 10^{-4}$     | 1.09            | $1.3 \cdot 10^{-4}$                | 0.88            |

Таблица 15.19

**Доли масс Ni (% к его массе в породе), сконцентрированные в максиминералах континентальных пород осадочного слоя**

| Минералы    | Осадочные                       |                                 | Вулканогенные                 |                                 |                               |                                   |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|             | Пески и песчаники               | Все осадочные                   | Кислые                        | Средние                         | Основные                      | В целом                           |
| Арсенопирит | < 0.01<br>( $3 \cdot 10^{-7}$ ) | < 0.01<br>( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.09<br>( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | < 0.01<br>( $1 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                       | < 0.01<br>( $1.2 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Пентландит  | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                       | Не опр.                         | 0.47<br>( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.34<br>( $5.7 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Всего       | < 0.01<br>( $3 \cdot 10^{-7}$ ) | < 0.01<br>( $8 \cdot 10^{-8}$ ) | 0.09<br>( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | < 0.01<br>( $1 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.47<br>( $1 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.34<br>( $6.9 \cdot 10^{-5}$ )   |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – среднее содержание минералов, %.

Таблица 15.20

**Доли масс Ni (% к его массе в породе), сконцентрированные в максиминералах магматических пород гранитно-гнейсового слоя**

| Минералы    | Граниты                         | Гранодиориты                  | Базиты                          | Сиениты                       | Ультрабазиты                    | В целом                           |
|-------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Арсенопирит | 0.11<br>( $5.6 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.02<br>( $4 \cdot 10^{-5}$ ) | < 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.01<br>( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | < 0.01<br>( $6 \cdot 10^{-7}$ ) | 0.01<br>( $4.5 \cdot 10^{-5}$ )   |
| Кобальтин   | 0.04<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | Не опр.                       | < 0.01<br>( $4 \cdot 10^{-7}$ ) | Не опр.                       | Не опр.                         | < 0.01<br>( $6.3 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Пентландит  | Не опр.                         | Не опр.                       | 9.86<br>(0.004)                 | Не опр.                       | 0.05<br>( $3 \cdot 10^{-4}$ )   | 4.6<br>( $4 \cdot 10^{-4}$ )      |
| Всего       | 0.15<br>( $6.6 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.02<br>( $4 \cdot 10^{-5}$ ) | 9.86<br>(0.004)                 | 0.01<br>( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | 0.05<br>( $3 \cdot 10^{-4}$ )   | 4.61<br>( $4.5 \cdot 10^{-4}$ )   |

**Доли масс Ni (% к его массе в породе), сконцентрированные  
в максиминералах метаморфических пород**

| Минералы    | Параметаморфические             |                                 |                                 | Ортометаморфические             |                                 |                                   |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
|             | Метапесчаники                   | Парасланцы                      | В целом                         | Гранито-гнейсы                  | Метабазиты                      | В целом                           |
| Арсенопирит | < 0.01<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ ) | Не опр.                         | < 0.01<br>( $4 \cdot 10^{-7}$ ) | < 0.01<br>( $4 \cdot 10^{-6}$ ) | < 0.01<br>( $2 \cdot 10^{-5}$ ) | < 0.01<br>( $7.5 \cdot 10^{-6}$ ) |
| Герсдорфит  | Не опр.                         | 0.04<br>( $1 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.04<br>( $9 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                           |
| Пентландит  | Не опр.                         | 0.44<br>( $1 \cdot 10^{-4}$ )   | 0.41<br>( $8.7 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                           |
| Виоларит    | Не опр.                         | 0.12<br>( $2.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.11<br>( $2.2 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                           |
| Гарниерит   | Не опр.                         | 0.21<br>( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.2<br>( $3.5 \cdot 10^{-5}$ )  | Не опр.                         | 0.06<br>( $2 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.04<br>( $3.3 \cdot 10^{-6}$ )   |
| Никелин     | Не опр.                         | 0.09<br>( $1.6 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.08<br>( $1.4 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.02<br>( $1 \cdot 10^{-6}$ )   | Не опр.                         | 0.01<br>( $8.2 \cdot 10^{-7}$ )   |
| Ваэсит      | Не опр.                         | 0.15<br>( $2.5 \cdot 10^{-5}$ ) | 0.14<br>( $2.2 \cdot 10^{-5}$ ) | Не опр.                         | Не опр.                         | Не опр.                           |
| Всего       | < 0.01<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ ) | 1.05<br>( $2.2 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.98<br>( $1.8 \cdot 10^{-4}$ ) | 0.02<br>( $5 \cdot 10^{-6}$ )   | 0.06<br>( $4 \cdot 10^{-5}$ )   | 0.05<br>( $1.2 \cdot 10^{-5}$ )   |

Примечание. Установлены также в метариолитах – гарниерит 0.61 ( $4 \cdot 10^{-5}$ ), в метаандезитах – арсенопирит 0.06 ( $5 \cdot 10^{-5}$ ).

нералах (4.61%), обеспечена в основном пентландитом базитов (табл. 15.20). В параметаморфических породах в максиминералах сконцентрировано 0.98% масс Ni. Это практически полностью обусловлено ситуацией в парасланцах. В ортометаморфических породах роль максиминералов по расчету мала (табл. 15.21).

#### 15.4.3. Обсуждение полученных данных

Данные о среднем содержании и распределении масс Ni в ассоциации большинства горных пород получены с учетом обширного фактического материала и для этой стадии исследования достаточно корректны. Исключение – осадочные породы (особенно кремнистые), среднее содержание Ni в них, возможно, несколько преувеличено. Исходные данные о вариациях содержаний никелевых максиминералов в горных породах относительно немногочисленны. Они получены микрообогатительными методами, при которых учитывались только частицы минералов крупностью 50–25 или > 30–50 мкм. Таким образом, исходные данные соответствуют не истинным, а минимально возможным значениям содержания этих максиминералов в горных породах. Приведенные выше значения долей масс Ni, сконцентрированных в максиминералах, также минимально возможные.

Возможности сопоставления результатов расчетов с минеральными балансами Ni в конкретных пробах горных пород крайне ограничены. Одним полным минеральным балансом Ni представлены граниты (Бушляков, Соболев, 1976). Здесь содержание Ni 0.003%, вся его масса находится в породообразующих минералах. В двух пробах дунитов Восточного Саяна, содержащих 0.25 и 0.3 Ni, практически вся масса Ni находится в оливине (Сутурин и др., 1978). Полные минеральные балансы Ni определены для габброидов и метасоматитов Бельтауского массива в Западном Узбекистане (Кромская, 1973), содержащих от 0.036 до 0.45% Ni. Здесь в максиминералах (пентландит, Ni-пирротин, никелин, ваэсит, виоларит, герсдорфит) сконцентрировано 88–98% масс Ni. Автором изучены четыре пробы метасоматитов из медно- и железоскарновых месторождений Турьинской группы, характеризующиеся малым содержанием Ni (0.0005–0.0023%). В одной из этих проб установлен кобальтин, в котором сконцентрировано 6% масс Ni. В пробе метасоматита с околоскарновым содержанием Ni тоже установлен кобальтин, содержащий всего 0.2% масс Ni (Григорьев, 1999). В трех пробах золотоносных кор выветривания Светлинского месторождения на Урале, содержащих 0.0041–0.011% Ni, его максиминералы не обнаружены. Отмеченные данные, ввиду их немногочисленности, отражают преимущественно индивидуальные особенности изученных разностей горных пород.

#### **15.4.4. Выводы**

Среднее содержание Ni в верхней части континентальной коры 0.005%. Главные носители Ni метаморфические породы. В них сосредоточено 71.75% всей массы Ni.

В верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 0.88% масс Ni, в том числе, %: в пентландите – 0.58, гарниерите – 0.11, ваэсите – 0.07, виоларите – 0.06, никелине – 0.04, герсдорфите – 0.02. Эти цифры минимально возможные.



Выполненная работа – частный результат разработки минералого-геохимической модели верхней части континентальной коры в составе осадочного и гранитно-гнейсового слоев на основе модели химического строения земной коры А.Б. Ронова и А.А. Ярошевского, А.А. Мигдисова (1990). Существенно дополнены данные о среднем химическом и минеральном составе верхней части континентальной коры, ее слоев и слагающих их горных пород. В настоящее время это наиболее подробная система данных, практически не имеющая внутренних противоречий. Эта система данных обеспечивает минеральный баланс 10 главных химических элементов в верхней части континентальной коры, ее слоях и каждой из горных пород с учетом 66 главных минералов. В каждом из отмеченных объектов сумма установленных в минералах долей масс любого из 10 главных химических элементов не выходит за пределы 94.5–105.5% от массы этого элемента в объекте в целом. Эта система – фундамент, на котором базируются все приведенные данные о 71 химическом элементе, 276 минералах (включая их разновидности) и трех неминеральных веществах.

В работе приведена наиболее полная из имеющихся в настоящее время система данных о средних содержаниях 57 химических элементов (H, Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, B, Al, Ga, C, Si, Ge, Sn, Pb, P, As, Sb, Bi, O, S, F, Cl, Cu, Ag, Au, Zn, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Yb, Lu, Th, U, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni) в важнейших горных породах. Определены или уточнены средние содержания еще 14 химических элементов (In, Tl, N, Br, J, Se, Te, Cd, Hg, Sc, Dy, Ho, Er, Tm) в большинстве важнейших горных пород. По этим данным вычислен новый вариант среднего химического состава верхней части континентальной коры. По среднему содержанию 15 наиболее важных химических элементов он практически соответствует второму варианту модели континентальной коры (фактически ее верхней части) по И.А. Резанову (2002). От всех остальных опубликованных вариантов среднего химического состава верхней части континентальной коры (Rudnick, Gao, 2004) предлагаемый вариант отличается главным образом несколько меньшим содержанием Si и большим Ca. Приводимые нами средние содержания остальных химических элементов в верхней части континентальной коры или не выходят за пределы значений публиковавшихся другими исследователями, или выходят за эти пределы незначительно.

И тем не менее публикуемые сейчас цифры средних содержаний химических элементов в горных породах нуждаются в дальнейшей коррекции. Особенно это относится к малым и редким элементам. Чем меньше среднее содержание химического элемента в земной коре, тем более значительны вариации его содержания в горных породах. Так, максимальные содержания Au в горных породах больше минимальных, по меньшей мере, в

100 000 раз. Приведенные здесь данные показывают, что важными носителями масс химических элементов являются участки горных пород с повышенным их содержанием. Корректный учет этого обстоятельства возможен только при наличии многих тысяч хорошо подобранных анализов, и чем меньше кларковое содержание химического элемента, тем больше анализов требуется для корректных заключений о среднем его содержании в горных породах.

Приводимые данные качественно подтверждают общеизвестные закономерности. В частности, они подтверждают представление о магматических породах гранитно-гнейсового слоя как о концентраторах многих малых и редких элементов, вместе с тем полученные данные показывают, что роль магматических пород как концентраторов ценных химических элементов обычно переоценивают. Средние коэффициенты концентрации ценных элементов здесь в большинстве случаев не превосходят 2.

Впервые определено распределение масс 66 химических элементов в ассоциациях горных пород, представляющих собой верхнюю часть континентальной коры.

В верхней части континентальной коры зависимость средних содержаний большинства химических элементов от состава горных пород значительно меньше, чем принято считать. Поэтому массы большинства химических элементов распределены здесь почти пропорционально массам горных пород. Больше половины (63.18%) массы верхней части континентальной коры представлено метаморфическими породами. Они и являются главными носителями масс большинства химических элементов. Исключение составляют С, N, Cl, Br, главными носителями которых являются осадочные породы. Магматические же породы – второстепенные носители масс всех химических элементов, поэтому весьма распространенное представление о них как об источниках масс химических элементов, сконцентрированных в эндогенных месторождениях, вероятно, справедливо лишь в отдельных частных случаях.

Впервые получены подробные данные о среднем минеральном составе верхней части континентальной коры, ее слоев и слагающих их горных пород. Основу этих данных составляют результаты количественных минералогических анализов около 3400 проб горных пород, опубликованные преимущественно в трудах ученых бывшего СССР. Результаты определений 66 наиболее важных минералов скорректированы для приведения их в соответствие со средним химическим составом горных пород. Средние содержания в горных породах остальных 213 акцессорных минералов рассчитаны преимущественно по результатам количественных минералогических анализов, выполненных микрообогатительными методами. Эти методы наиболее совершенны, но не лишены недостатков. Главный – преуменьшение содержания акцессорных минералов в результате учета лишь частиц крупнее 10–100 мкм. Таким образом, приведенные выше величины содержания большинства акцессорных минералов в горных породах минимально возможные.

Впервые определены те доли масс 57 химических элементов, которые сконцентрированы в максиминералах (абсолютных минералах-концентра-

торах) или в их аналогах. Расчет выполнен сначала для каждой горной породы отдельно, а затем для всей ассоциации горных пород с учетом соотношения их масс. Ниже даны результаты последней части расчета. Они выражены в процентах тех масс каждого из химических элементов, которые имеются в верхней части континентальной коры (масса химического элемента принята за 100%). Химические элементы ранжированы по их среднему содержанию в верхней части континентальной коры, %:

**Si – 41.03** (кварц – 39.54, опал – 1.91).

**Al – 2.66** (силлиманит – 1.33, диаспор – 0.33, андалузит – 0.27, гиббсит – 0.19, ставролит – 0.19, бемит – 0.11, шпинель – 0.11, дистен – 0.09, корунд – 0.03, сапфирин – 0.01).

**Fe – 20.46** (магнетит – 11.5, ильменит – 1.76, гематит – 1.35, сидерит – 1.35, гетит – 1.31, тюрингит – 1.06, Ti-магнетит – 0.91, пирит – 0.72, пирротин – 0.44, фаялит – 0.05, марказит – 0.01).

**Ca – 39.2** (флюорит – 0.03, апатит – 1.32, кальцит – 37.5, арагонит – 0.36).

**K – 51.916** (сильвин – 0.016, калиевые полевые шпаты – 51.9).

**Na – 3.58** (галит).

**Mg – 5.85** (брусит – 0.01, форстерит – 0.22, клиногумит – 0.03, гумит – 0.02, магнезит – 0.24, серпентин – 1.05, оливин – 0.54, пеннин – 3.22, энстатит – 0.52).

**C – 27.38** (графит – 14.8, органические вещества – 12.58).

**Ti – 30.07** (ильменит – 14.2, титанит – 11.1, Ti-магнетит – 1.96, рутил – 1.62, лейкоксен – 0.92, анатаз – 0.27).

**H – 34.18** (рипидолит – 14.94, клинохлор – 5.08, шамозит – 3.89, каолинит – 2.44, пеннин – 2.27, лосонит – 1.78, бейделлит – 1.18, тюрингит – 0.81, серпентин – 0.68, гетит – 0.57, томсонит – 0.54).

**Cl – 73.04** (галит – 72.58, сильвин – 0.21, скаполит – 0.19, карналлит – 0.05, бишофит – 0.01, содалит – < 0.01).

**S – 43.47** (пирит – 24.08, пирротин – 7.98, ангидрит – 7.49, гипс – 3.1, марказит – 0.46, кизерит – 0.11, барит – 0.07, сера самородная – 0.06, ярозит – 0.04, халькопирит – 0.03, целестин – 0.02, пентландит – 0.02, сфалерит – 0.01).

**Mn – 7.02** (браунит – 1.8, тефроит – 0.98, гаусманит – 0.93, спессартин – 0.73, родохрозит – 0.63, пиролюзит – 0.43, голландит – 0.41, кутнагорит – 0.31, псиломелан – 0.2, криптомелан – 0.14, манганит – 0.12, родонит – 0.12, Mn-кальцит – 0.07, яковсит – 0.07, тодорokit – 0.06, вернадит – 0.02).

**P – 35.67** (apatит – 33.54, карбонат-апатит – 1.89, монацит – 0.23, ксенотим – 0.01).

**F – 7.3** (апатит – 4.84, флюорит – 2.08, топаз – 0.18, гумит – 0.08, клиногумит – 0.07, бастнезит – 0.05).

**Ba – 0.99** (барит – 0.72, целестин – 0.05, голландит – 0.15, псиломелан – 0.07).

**Sr – 0.4** (целестин – 0.26, барит – 0.14).

**Zr – 28.41** (циркон – 28.4, эвдиалит – 0.01).

**V – 1.3** (Ti-магнетит).

**Rb – 0.32** (Rb-биотит – 0.23, Rb-мусковит – 0.091, лепидолит – 0.0008, протолиитонит – 0.0001).

**Cr – 0.64** (хромшпинелиды).  
**Zn – 0.31** (сфалерит).  
**Ce – 11.96** (ортит – 5.64, монацит – 5.06, бастнезит – 1.26).  
**Ni – 0.88** (пентландит – 0.58, гарниерит – 0.11, ваэсит – 0.07, виоларит – 0.06, никелин – 0.04, герсдорфит – 0.02).  
**Cu – 1.186** (халькопирит – 0.975, ковеллин – 0.06, борнит – 0.036, кубанит – 0.035, азурит – 0.035, малахит – 0.029, медь самородная – 0.011, халькозин – 0.004, блеклые руды – 0.001).  
**Sn – 0.66** (касситерит).  
**B – 4.08** (турмалин – 3.91, корнерупин – 0.16, аксинит – 0.01).  
**Li – 8.34** (Li-биотит – 6.9, Li-мусковит – 1.42, сподумен – 0.01, лепидолит – 0.004, циннвальдит – 0.002, протолиитионит – 0.0002).  
**La – 12.69** (ортит – 6, монацит – 5.28, бастнезит – 1.4, гадолинит – 0.01).  
**Nd – 9.13** (монацит – 5.38, ортит – 3.48, бастнезит – 0.25, иттриалит – 0.01, гадолинит – 0.01).  
**Y – 4.25** (ортит – 1.85, монацит – 1.45, ксенотим – 0.69, иттриалит – 0.14, гадолинит – 0.06, эвксенит – 0.03, фергусонит – 0.02, блонстрандин – 0.01).  
**Co – 0.28** (голландит – 0.14, псиломелан – 0.05, пентландит – 0.05, кобальтин – 0.02, виоларит – 0.01, арсенопирит – 0.01).  
**Pb – 1.02** (галенит – 0.97, церуссит – 0.03, англезит – 0.01, самородный свинец – 0.01).  
**Nb – 0.71** (ильменорутит – 0.26, колумбит – 0.26, эвксенит – 0.09, фергусонит – 0.06, пирохлор – 0.03, блонстрандин – 0.01).  
**Th – 17.47** (монацит – 8.29, ортит – 5.8, торит – 3.08, иттриалит – 0.14, ксенотим – 0.12, уранинит – 0.02, эвксенит – 0.01, фергусонит – 0.01).  
**Pr – 12.06** (монацит – 5.98, ортит – 4.86, бастнезит – 1.21, гадолинит – 0.01).  
**Gd – 4.24** (монацит – 2.48, ортит – 1.45, ксенотим – 0.13, бастнезит – 0.1, иттриалит – 0.05, гадолинит – 0.01, эвксенит – 0.01, фергусонит – 0.01).  
**As – 1.61** (арсенопирит – 0.71, никелин – 0.5, герсдорфит – 0.24, аурипигмент – 0.09, кобальтин – 0.07).  
**Sm – 7.43** (монацит – 3.88, ортит – 3.2, бастнезит – 0.28, иттриалит – 0.03, гадолинит – 0.02, эвксенит – 0.01, фергусонит – 0.01).  
**Cs – 0.243** (Cs-биотит – 0.2, берилл – 0.02, Cs-стекла – 0.018, лепидолит – 0.004, протолиитионит – 0.001).  
**Dy – 5.42** (ортит – 4.5, монацит – 0.43, ксенотим – 0.29, иттриалит – 0.14, фергусонит – 0.03, эвксенит – 0.02, гадолинит – 0.01).  
**Hf – 24** (циркон).  
**Er – 4.51** (ортит – 3.73, ксенотим – 0.47, иттриалит – 0.18, фергусонит – 0.06, эвксенит – 0.04, гадолинит – 0.01, блонстрандин – 0.01, чевкинит – 0.01).  
**Yb – 6.47** (ортит – 5.74, ксенотим – 0.34, иттриалит – 0.26, эвксенит – 0.06, фергусонит – 0.05, гадолинит – 0.01, блонстрандин – 0.01).  
**U – 5.72** (ортит – 2.11, уранинит – 1.83, монацит – 1.4, эвксенит – 0.15, иттриалит – 0.11, торит – 0.08, фергусонит – 0.02, блонстрандин – 0.01, циртолит – 0.01).  
**W – 2.23** (вольфрамит – 0.23, шеелит – 2).

**Be – 1.29** (берилл – 0.65, фенакит – 0.2, берtrandит – 0.17, хризоберилл – 0.11, гелвин – 0.1, гадолинит – 0.06).

**Mo – 4.64** (молибденит – 4.49, шеелит – 0.14, повеллит – 0.01).

**Eu – 1.87** (монацит – 0.9, ортит – 0.7, бастнезит – 0.25, иттриалит – 0.01, фергусонит – 0.01).

**Ta – 1.58** (ильменорутит – 0.8, колумбит – 0.34, эвксенит – 0.28, пироклор – 0.02, танталит – 0.1, фергусонит – 0.02, блонстрандин – 0.02).

**Ho – 4.43** (ортит – 3.32, ксенотим – 0.89, иттриалит – 0.1, бастнезит – 0.05, эвксенит – 0.03, фергусонит – 0.02, гадолинит – 0.02).

**Sb – 0.059** (пираргирит – 0.02, тетраэдрит – 0.017, фрейбергит – 0.01, стефанит – 0.007, антимонит – 0.004, джемсонит – 0.001).

**Tb – 9.71** (ортит – 7.01, монацит – 2.34, ксенотим – 0.21, иттриалит – 0.1, фергусонит – 0.02, гадолинит – 0.02, эвксенит – 0.01).

**Cd – 0.32** (сфалерит).

**Lu – 6.87** (ортит – 6, ксенотим – 0.58, иттриалит – 0.2, фергусонит – 0.06, эвксенит – 0.03).

**Bi – 0.74** (висмутит – 0.31, висмутин – 0.25, висмут самородный – 0.15, тетрадимит – 0.03).

**Ag – 2.62** (серебро самородное – 0.99, аргентит – 0.56, пираргирит – 0.4, акантит – 0.31, стефанит – 0.22, фрейбергит – 0.07, хлораргирит – 0.03, золото самородное – 0.02, медь самородная – 0.01, тетраэдрит – 0.01).

**Hg – 0.771** (киноварь – 0.757, метациннабарит – 0.01, блеклые руды – 0.003, реальгар – 0.001).

**Se – 0.0011** (висмут – 0.0009, киноварь – 0.0002).

**Au – 4.1–4.6** (самородное золото).

В целом, видна тенденция прямой зависимости средних долей масс, сконцентрированных в максиминералах, от среднего содержания химических элементов в верхней части континентальной коры, но эта тенденция просматривается на фоне многочисленных отклонений от нее. Часть отклонений, вероятно, обусловлена влиянием кристаллохимических свойств элементов. Это относится к группам химических элементов, близких в кристаллохимическом отношении (Григорьев, 1999). Доли масс каждого из таких элементов, сконцентрированные в максиминералах, зависят от суммарного содержания всей группы элементов в горных породах. Отсюда понятна концентрация относительно больших долей масс лантаноидов в максиминералах.

Данные, относящиеся к Ba, Sr, V, Ni, Co, Sb, Cd, Bi, наиболее нуждаются в уточнении, но оно возможно только путем постановки специальных исследований.

Максиминералы – главная форма максимальной концентрации химических элементов в природе. Меняются технологии переработки минерального сырья, но почти все они включая еще только разрабатываемые ориентированы на извлечение химических элементов и их соединений из максиминералов и их неминеральных аналогов. В производство вовлекаются все новые максиминералы, не использовавшиеся раньше. Согласно полученным данным, потенциально извлекаемый резерв некоторых химических элементов представлен преимущественно минералами, пока не являющимися тра-

диционными источниками этих элементов. Примеры – некоторые разности следов такие, как максиминералы Li, Rb, Cs. Но промышленность способна к переориентации. Примером может быть алюминиевая промышленность. Здесь традиционное сырье – гидроксиды алюминия – уже уступает место алюминиевым силикатам.

Требования к содержанию максиминералов в минеральном сырье уменьшаются, требования к запасам минерального сырья возрастают. Прогнозы обеспеченности человечества минеральным сырьем пока строятся на основе данных о реальных и прогнозных запасах этого сырья. Однако само представление о минеральном сырье меняется. Уменьшение запасов традиционного минерального сырья восполняется вовлечением в производство горных пород с повышенным содержанием максиминералов. Перспективы этой тенденции ограничены лишь величиной резерва масс химических элементов, сконцентрированных в максиминералах распространенных горных пород.

Оценка отмеченного резерва актуальна еще и потому, что большинство максиминералов характеризуется повышенной химической активностью. Это первоисточники опасных веществ, изменяющих сейчас состав среды нашего обитания. Особенно важно получение таких данных о верхней части континентальной коры, подвергающейся наибольшему антропогенному воздействию.

Установлено, что в общей массе верхней части континентальной коры (принятой за 100%) доли потенциально извлекаемых масс химических элементов составляют, %: Si – 12.15, Ca – 1.53, K – 1.15, Fe – 0.83, Al – 0.21, Ti – 0.12, Cl – 0.11, Mg – 0.1, C – 0.082, Na – 0.074, S – 0.061, H – 0.057, P – 0.025, Zr – 0.0045, F – 0.0037, Mn – 0.003, Ce –  $7.5 \cdot 10^{-4}$ , Ba –  $5 \cdot 10^{-4}$ , La –  $4.1 \cdot 10^{-4}$ , Li –  $2.8 \cdot 10^{-4}$ , Nd –  $2.6 \cdot 10^{-4}$ , Th –  $1.6 \cdot 10^{-4}$ , Sr –  $1.1 \cdot 10^{-4}$ , Y –  $1.1 \cdot 10^{-4}$ , Hf –  $1.1 \cdot 10^{-4}$ , B –  $1 \cdot 10^{-4}$ , Pr –  $1 \cdot 10^{-4}$ , Cr –  $5.9 \cdot 10^{-5}$ , Cu –  $4.6 \cdot 10^{-5}$ , Ni –  $4.4 \cdot 10^{-5}$ , Sm –  $4.2 \cdot 10^{-5}$ , Rb –  $3 \cdot 10^{-5}$ , Gd –  $2.7 \cdot 10^{-5}$ , Dy –  $2.6 \cdot 10^{-5}$ , Zn –  $2.3 \cdot 10^{-5}$ , Pb –  $1.9 \cdot 10^{-5}$ , Yb –  $1.6 \cdot 10^{-5}$ , U –  $1.4 \cdot 10^{-5}$ , Er –  $1.2 \cdot 10^{-5}$ , As –  $9 \cdot 10^{-6}$ , Nb –  $8.6 \cdot 10^{-6}$ , Tb –  $8.6 \cdot 10^{-6}$ , Mo –  $7.2 \cdot 10^{-6}$ , Ho –  $5.8 \cdot 10^{-6}$ , Co –  $4.8 \cdot 10^{-6}$ , W –  $4.5 \cdot 10^{-6}$ , Lu –  $3.3 \cdot 10^{-6}$ , Be –  $3 \cdot 10^{-6}$ , Sn –  $2.5 \cdot 10^{-6}$ , Eu –  $2.4 \cdot 10^{-6}$ , Ta –  $2.2 \cdot 10^{-6}$ , Cs –  $1.3 \cdot 10^{-6}$ , Ag –  $2.9 \cdot 10^{-7}$ , Bi –  $2.1 \cdot 10^{-7}$ , Hg –  $5 \cdot 10^{-8}$ , Sb –  $4.9 \cdot 10^{-8}$ , Au –  $1.8 \cdot 10^{-8}$ .

В целом, потенциально-извлекаемые массы наиболее ценных или токсичных химических элементов (Fe, Al, Ti, Cl, Mg, C, S, P, Zr, F, Mn и др.) составляют 1.6% всей массы верхней части континентальной коры. Этот резерв соответствует потребностям цивилизации значительно более мощной, чем наша.

Полученные данные – только первое приближение к пониманию истинной ситуации. Одна из главных причин этого – недостаточное совершенство модели А.Б. Ронова с коллегами (1990). Однако все приводимые здесь данные о химическом и минеральном составе горных пород, о роли минералов в качестве концентраторов и носителей химических элементов в горных породах хотя и нуждаются в уточнении, могут быть использованы в любой новой, более совершенной модели строения верхней части континентальной коры. Уточнение и детализация полученных данных – задача будущих исследований. Но, судя по полученным данным, сейчас главная за-

дача – это разработка стратегии рационального и безопасного пользования тем огромным резервом потенциальных ресурсов, который имеется в среде нашего обитания. Последствия современного стихийного отношения к этому резерву могут оказаться непредсказуемыми.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 09-05-12035-офи\_м. «Нетрадиционные и новые типы месторождений золота и платиноидов».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

- Абдуллаев З.Б.* Базит-гипербазитовый комплекс офиолитовой ассоциации Малого Кавказа: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Баку, 1992.
- Адамчук И.П., Пачаджанов Д.Н., Мельникова Н.Д., Валиев Ю.Я.* К геохимии рубидия и цезия в осадочном процессе (на примере мезозойских отложений Таджикской депрессии) // *Геохимия*, 1977. № 2. С. 254–272.
- Акрамов Б.М., Дусматов В.Д.* Акцессорные минералы докембрийских ортоамфиболитов Центрального Памира // *Акцессорные минералы докембрия*. М.: Наука, 1986. С. 170–175.
- Аксаментова Н.В.* Раннепротерозойский щелочнобазитовый вулканизм начальной стадии рифтогенеза на западе Русской плиты // *Вулканизм и геодинамика*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 63–68.
- Акульшина Е.П.* Вещественный состав глинистой части пород палеозоя Сибирской и Русской платформ и его эволюция. Новосибирск: Наука, 1971. 150 с.
- Алексеев В.Р., Каминский Ф.В.* Проявления позднерифейского траппового магматизма на востоке Алданского щита // *Сов. геология*, 1971. № 8. С. 164–167.
- Алексеев В.Д., Шор Г.М., Спиридонов А.А. и др.* Геохимическая зональность осадочного слоя земной коры западных районов Восточного Казахстана // *Геохимия платформенных и геосинклинальных осадочных пород и руд*. М.: Наука, 1983. С. 107–116.
- Альмухамедов А.И.* Поведение титана в процессах дифференциации базальтовой магмы // *Геохимия*, 1967. № 1. С. 75–85.
- Анастасенко Г.Ф.* Распределение бора в породах и минералах трапповой формации северо-запада Сибирской платформы // *Геохимия*, 1973. № 10. С. 1481–1489.
- Андреев В.И., Карпов Г.А., Пузанков Ю.М., Фазлуллин С.М.* Распределение радиоактивных элементов в породах некоторых действующих вулканов Камчатки // *Вулканология и сейсмология*, 2001. № 1. С. 39–48.
- Аникиев В.В., Шумилин Е.Н., Дударев О.В. и др.* Пространственная изменчивость литологических характеристик и химических элементов в донных осадках шельфа Южно-Китайского моря, примыкающего к дельтам рек Меконг–Сайгон // *Геохимия*, 2004. № 12. С. 1301–1318.
- Антипин В.С.* Петрология и геохимия гранитоидов различных фаций глубинности. Новосибирск: Наука, 1977. 157 с.
- Антипин В.С., Коваленко В.И., Петров Л.Л.* Распределение бора между вкрапленниками и основной массой эффузивных и субвулканических пород // *Геохимия*, 1982. № 11. С. 1639–1657.
- Антипин В.С., Коваленко В.И., Кузнецова А.И., Персикова Л.А.* Поведение олова и вольфрама в рудоносных кислых магматических породах на основе анализа коэффициентов распределения // *Геохимия*, 1981. № 2. С. 163–178.
- Антонов А.Ю.* Геохимия и петрология мезозойско-кайнозойских магматических образований южного обрамления Алданского щита. Проблемы геодинамики // *Тихоокеанская геология*, 2007. Т. 26, № 2. С. 56–81.
- Антонов А.Ю.* Зарубежные месторождения серебра. М.: Недра, 1992. 254 с.
- Анфимов Л.В.* Литогенез в рифейских осадочных толщах Башкирского мегантиклинория (Ю. Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 289 с.
- Апрелков С.Е., Марченко А.Р., Шеймович В.С.* Некоторые петрохимические особенности четвертичного вулканизма Камчатки // *Петрохимические особенности молодого вулканизма*. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 35–42.



Арсеньева А.Д., Брусницына Н.В., Ляхович В.В., Руб М.Г. Акцессорные минералы в породах вулканоплутонических комплексов Балыгычано-Сугойского района (Северо-Восток СССР) // Акцессорные минералы в решении вопросов металлогении и происхождения магматических комплексов. М.: ИМГРЭ, 1969. С. 67–80.

Арутюнов Г.М. Новые данные по геохимии продуктивных гнейсов Чупино-Лоухского района (Северная Карелия) // Минералогия и геохимия докембрия Карелии. Л.: Наука, 1971. С. 48–53.

Афанасьева И.М. Петрохимические особенности флишевой формации южного склона советских Карпат. Киев: Наук. думка, 1979. 242 с.

Афанасьева И.М. Литогенез и геохимия флишевой формации северного склона советских Карпат. Киев: Наук. думка, 1983. 183 с.

Ахмедов А.М., Крупеник В.А., Свешникова К.Ю. и др. Аридные режимы седиментации в раннем докембрии (вепсии) и девоне: сравнительный анализ // Проблемы литологии, геохимии и рудогенеза осадочного процесса. М.: ГЕОС, 2000. Т. 1. С. 46–49.

Бабкин В.Ф. Минералы тяжелой фракции терригенных образований палеозоя (Центральный Таджикистан) // Минеральные кларки и природа их устойчивости. Душанбе: До-ниш, 1986. С. 145–146.

Баженов А.Г., Красина А.С., Покровский П.В. Бериллий в Ильменогорском миеаскитовом массиве // Элементы-примеси в минералах и горных породах Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. С. 3–20.

Байраков В.В., Быков Ю.А., Горошников Б.И. и др. Минеральный состав и обогащенность силлиманитовых гнейсов Соломиевского месторождения // Разведка и охрана недр, 1966. № 7. С. 17–20.

Балашиов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 267с.

Бартикян М.П. Акцессорные минералы Шамшадинской группы интрузивов (Армения) // Акцессорные минералы изверженных пород. М.: Наука, 1968. С. 108–115.

Батиева И.Д., Бельков И.В. Сахарйокский щелочной массив, слагающие его горные породы и минералы. Апатиты, 1984. 133 с.

Батиева И.Д., Бельков И.В. Закономерности концентрации рудных элементов в связи со щелочными гранитоидами Кольского полуострова // Закономерности концентрации рудных элементов в гранитоидных формациях Карело-Кольского региона. Апатиты, 1985. С. 62–72.

Баталин Ю.В., Станкевич Е.Ф., Касимов Б.С. и др. Давсонит и перспективы его поисков в СССР // Сов. геология, 1975. № 3. С. 30–37.

Беа Ф., Ферштатер Г.Б., Шардакова Г.Ю., Вилисов В.А. Фосфор в породообразующих минералах гранитов и аплитов // Ежегодник-1990 ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 1991. С. 81–83.

Белевцев Я.Н., Егоров Ю.П., Олейник О.А. и др. Содержание малых элементов в главнейших типах горных пород Украинского щита // Геол. ж., 1976. Т. 36, № 4. С. 56–74.

Белолипецкий О.П., Болотов В.И., Гавриленко Б.В. и др. Геохимия метаморфического комплекса пород зоны Колмозеро-Воронья на Кольском полуострове и перспективы ее рудоносности // Научные основы геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых и оценки потенциальной рудоносности магматических и метаморфических комплексов докембрия. Апатиты, 1972. С. 44–50.

Бельков И.В. Акцессорные минералы гранитоидов Кольского полуострова. Л.: Наука, 1979. 185 с.

Бельков И.В., Батиева И.Д., Виноградова Г.В., Виноградов А.Н. Минерализация и флюидный режим контактовых зон интрузий щелочных гранитов. Апатиты, 1988. 110 с.

Белькова Л.Н., Огнев В.Н., Кангро О.Г. Докембрий Южного Тянь-Шаня и Кызылкумов. М.: Недра, 1972. 132 с.

Беляев А.М. Закономерности распределения рудных элементов в пегматитах, пегматоидных гранитах и гранито-гнейсах Северного Приладожья // Закономерности концентрации рудных элементов в гранитоидных формациях Карело-Кольского региона. Апатиты, 1985. С. 89–96.

Бетелев Н.П. О находке бемита в сухарных каолиновых глинах Сталиногорского района нижнего карбона Татарии // Докл. АН СССР, 1960. Т. 133, № 4. С. 928–932.

Беус А.А. Геохимия бериллия и генетические типы бериллиевых месторождений. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 330 с.

Беус А.А. Геохимия литосферы. М.: Недра, 1981. 335 с.

Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1976. 248 с.

Билоножка П.М., Винар О.Н., Мельников В.С. О минеральном составе глин соляных пород калийных месторождений Прикарпатья // Вопросы минералогии осадочных образований. Кн. 7. Львов, 1966. С. 145–158.

Бобохов А.С. Некоторые элементы-примеси в кислых вулканитах колчеданосных формаций Южного Урала // Микроэлементы в магматических, метаморфических и рудных формациях Урала. Уфа, 1987. С. 24–30.

Богдецкий В.Н. Распределение рудообразующих элементов в непрерывно дифференцированных интрузивных сериях (на примере Сонкульского комплекса) // Геохимия магматических и метаморфических образований Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1989. С. 72–92.

Бойко Т.Ф. Редкие элементы в галогенных формациях. М.: Наука, 1973. 183 с.

Болотов В.И., Иванов А.А. Метаосадочные породы железисто-кремнистых формаций Приимандровского и Аллареченского районов // Геохимия и условия формирования осадочных толщ докембрия Кольского полуострова. Апатиты, 1980. С. 10–20.

Бондаренко В.Н., Хотин М.Ю. Неогеновый вулканизм Камчатки, его петрохимические особенности и металлогения // Петрохимические особенности молодого вулканизма. М., 1963. С. 43–55.

Борисенко Л.Ф., Сердобова Л.И. О распределении титана, хрома и никеля в гипербазитах платиноносного пояса. Урал // Геохимия, 1965. № 3. С. 348–359.

Борисенко Л.А. Геохимия галлия. М.: Изд-во МГУ, 1971. 230 с.

Боровник Д.П., Хмелевский В.А. Основные особенности минералогии и геохимии Бурштынского месторождения марганца // Вопросы минералогии осадочных образований. Кн. 7. Львов, 1966. С. 97–114.

Бородин Л.С. Эволюционные петрохимические тренды и оценка состава верхней континентальной коры // Геохимия, 1996. № 1. С. 5–14.

Брик К.А., Мурзин В.В., Киселева Л.О. и др. Распределение золота по формам и фракциям крупности в песках россыпных месторождений // Минеральный баланс химических элементов в горных породах и рудах Урала. Свердловск, 1989. С. 29–36.

Бровчук И.Ф., Миронюк А.Ф. Распределение олова в палеозойских гранитоидах и осадочно-метаморфических породах Малого Хингана // Геохимические циклы Дальнего Востока. Владивосток, 1969. С. 89–96.

Бровчук И.Ф., Недашковский П.Г., Овчарек Э.С. Возрастные взаимоотношения палеозойских гранитоидов Малого Хингана и распределение в них тантала и ниобия // Геохимические циклы Дальнего Востока. Владивосток, 1969. С. 77–82.

Брусницын А.И. Родонитовые месторождения Среднего Урала (минералогия и генезис). СПб.: Изд-во ун-та, 2000. 200 с.

Буданова К.Т. Метаморфические формации Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1991. 336 с.

Булах А.Г. Общий минеральный состав земной коры // Зап. Всерос. минерал. о-ва, 1996. Ч. 125, № 4. С. 23–28.

Бушляков И.Н. Распределение золота в гранитоидах Верхисетского массива на Урале // Геохимия, 1971. № 12. С. 1442–1448.

Бушляков И.Н. Роль флюорита как носителя фтора в гранитоидах // Минеральный баланс химических элементов в горных породах и рудах Урала. Свердловск, 1989. С. 54–61.

Бушляков И.Н. Баланс хлора в гранитоидах и метаморфитах Урала // Там же. С. 62–69.

Бушляков И.Н., Григорьев Н.А. Бериллий в метаморфических породах Урала // Геохимия, 1988. № 9. С. 1296–1301.

Бушляков И.Н., Григорьев Н.А. Бериллий в гранитоидах Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 1994. 234 с.

Бушляков И.Н., Соболев И.Д. Петрология, минералогия и геохимия гранитоидов Верхисетского массива. М.: Наука, 1976. 339 с.

Ван А.В. Происхождение меловых бокситоносных песчаников Туруханского района (Красноярский край) // Проблемы геологии алюминиевого сырья Сибири. Новосибирск, 1977. С. 71–75.

Варганова Р.С., Нестеренко Э.В., Райкова М.И. Сборник химических анализов метаморфических горных пород Урала. Свердловск: Ср.-Урал. кн. изд-во, 1971. 223 с.

Великославинский Д.А. Изменение химического состава метапелитов Мамской серии Северо-Байкальского нагорья с увеличением степени регионального метаморфизма // Ультраметаморфизм и метасоматоз докембрийских формаций СССР. М.; Л.: Наука, 1966. С. 3–24.

Вернадский В.И. Избранные сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1954. Т. 1. 690 с.

Вернадский В.И. Избранные сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 4. 624 с.

Вигорова В.Г. Минеральные балансы бериллия в гранитоидах Приполярного Урала // Минеральный баланс химических элементов в горных породах и рудах Урала. Свердловск, 1989. С. 86–93.

Вигорова В.Г., Покровский П.В. Некоторые особенности акцессорной минерализации гранитоидов центральной и восточной части Приполярного Урала // Геология и полезные ископаемые северо-востока европейской части СССР и севера Урала. Сыктывкар: Коми фил. АН СССР, 1973. Т. 2. С. 334–340.

Викентьев И.В., Юдовская М.А., Молошаг В.П., Чадченко А.В. Благородные металлы в колчеданных рудах Учалинско-Александринского района (Южный Урал) // Металлогения древних и современных океанов-2004. Т. 2. Месторождения благородных металлов, проблемы минералого-геохимических и геоэкологических исследований. Миасс, 2004. С. 14–24.

Виноградов А.Н. Минеральные парагенезисы и особенности метаморфизма гнейсов района устья реки Умбы // Материалы по геологии и металлогении Кольского полуострова. Апатиты, 1972. С. 51–56.

Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.

Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия, 1962. № 7. С. 555–571.

Винокурова Т.Н., Долгушина А.А., Амишинский Н.Н. и др. Акцессории гранитоидов области сочленения структур Алтая, Западного Саяна и Западной Тувы // Акцессорные минералы магматических и метаморфических пород. М.: Наука, 1982. С. 40–52.

Воинов А.С., Полеховский Ю.С. Кварц-полевошпатовые метасоматиты восточной части Балтийского щита (геологические особенности, геохимическая специализация) // Закономерности концентрации рудных элементов в гранитоидных формациях Карело-Кольского региона. Апатиты, 1985. С. 53–61.

Волкова А.Н., Рекишнская Л.Г. Эпигенетический давсонит в угленосной формации Кузбасса // Проблемы генезиса бокситов. М., 1975. С. 303–309.

Волков И.И., Соколова Е.Г. Геохимия селена в осадках Черного моря // Литология и полезные ископаемые, 1976. № 1. С. 38–56.

Волкова Н.И., Мельниченко А.К., Гофен Г.И. и др. Геохимические особенности метапелитов ФАН-Каратегинского зеленосланцевого пояса // Геохимия, 1994. № 5. С. 671–680.

Володичев О.И. Метаморфизм фации дистеновых гнейсов на примере Беломорского комплекса. Л.: Наука, 1975. 170 с.

Волчек Е.Н. Геодинамические обстановки кислого вулканизма западного сектора севера Урала. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. 144 с.

Воронов Б.И. Редкометалльная минерализация Западного Прикамья // Урал. геол. ж., 1999. № 3. С. 101–104.

Воронов А.Е., Селиванова Г.И. Особенности поведения свинца и цинка в нижнепалеозойских гранитоидах центральной части Восточного Саяна // Геохимия, 1971. № 9. С. 40–47.

Воронцов А.Е., Лин Н.Г. Рубидий и литий в гранитоидах Бугульминского комплекса (Восточный Саян) // Геохимия, 1966. № 11. С. 1377–1384.

Вотьяков С.Л., Горохов И.М., Борисов Д.Р. и др. К вопросу об оценке постседиментационной сохранности карбонатов по спектроскопическим данным // Ежегодник-1996 ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 1997. С. 155–161.

Вулканизм и седиментогенез докембрия северо-востока Балтийского щита / А.А. Предковский, В.А. Мележик, В.В. Болотов и др. Л.: Наука, 1987. 185 с.

Габинет М.П., Голдинов А.А., Шевченко Ю.В. Минеральный состав и условия образования пород Поляницкой свиты Украинского Предкарпатья // Вопросы минералогии осадочных образований. Кн. 7. Львов, 1966. С. 115–128.

Гаврикова С.Н., Гирнис А.В., Николаева Л.Л., Орлов В.Н. Геохимия и генезис докембрийских метабазитовых пород восточной части Становой области, Восточная Сибирь // Геохимия, 1995. № 4. С. 420–439.

Гавриленко Б.В. Геохимия золота в метаморфических и магматических комплексах северо-востока Балтийского щита. Апатиты, 1982. 143 с.

Гаврилов Ю.О., Щепетова Е.В., Барабошкин Е.Ю., Шербинина Е.А. Аноксический раннемеловой бассейн Русской плиты: седиментология и геохимия // Литология и полез. ископаемые, 2002. № 4. С. 359–380.

Гавшин В.М., Бахтуров С.Ф. Геохимия нижнепалеозойских отложений углеродистосланцевой формации (Сары-Джаз, Беркутская свита) // Микроэлементный состав осадочных толщ как показатель условий их формирования. Новосибирск, 1989. С. 83–104.

Гавшин В.М., Бобров В.А., Демина Р.Г., Дорогиницкая Л.М. Распределение урана, тория и калия в морских терригенных отложениях мезозоя Западно-Сибирской плиты // Геохимия рудных элементов в процессах выветривания, осадконакопления и катагенеза. Новосибирск, 1979. С. 128–160.

Гавшин В.М., Бобров В.А., Демина Р.Г. и др. Геохимия морских терригенных отложений Западно-Сибирской плиты // Геохимия платформенных и геосинклинальных осадочных пород и руд. М.: Наука, 1983. С. 48–56.

Гавшин В.М., Никитин И.А. Радиогеохимическая специфика осадочных толщ Сибирской платформы // Микроэлементный состав осадочных толщ как показатель условий их формирования. Новосибирск, 1989. С. 5–31.

Галимов Э.М. О причине избытка кальция и недостатка натрия в осадочной оболочке Земли // Геохимия, 1975. № 8. С. 1251–1257.

Галимов Э.М. Способность к предвидению – свойство, выделившее Человека в биосфере // Вест. РАН, 2001. Т. 1, № 7. С. 611–614.

Ганзеев А.А., Соболев С.Ф., Бельков В.И. Редкие элементы в крупных промышленных месторождениях докембрийских железистых кварцитов // Редкие элементы: сырье и экономика. Вып. 13. М., 1977. С. 15–22.

Гареев Э.З., Веретенникова Т.Ю. Петрохимия и геохимия глинисто-карбонатных пород стратотипического разреза Авзянской свиты на Южном Урале // Микроэлементы в магматических, метаморфических и рудных формациях Урала. Уфа, 1987. С. 61–68.

Гелетий В.Ф., Гапон А.Е., Калмычков Г.В. и др. Ртуть в поверхностных донных осадках озера Байкал // Геохимия, 2005. № 2. С. 220–226.

Геология и петрология архейского гранитно-зеленокаменного комплекса Центральной Карелии. Л.: Наука, 1978. 664 с.

Геохимическая модель тихоокеанской окраины Азии. М.: Наука, 1984. 235 с.

Геохимия варисских интрузивных комплексов Северного Тянь-Шаня / Р.Д. Гаврилин, Б.И. Злобин, Л.Л. Леонова и др. М.: Наука, 1966. 247 с.

Геохимия древних толщ Северного Урала / Я.Э. Юдович, М.П. Кетрис, И.В. Швецова и др. Сыктывкар: Геопринт, 2002. 333с.

Геохимия золота. Владивосток: ДВГИ СО АН СССР, 1978. 135с.

Геохимия континентального вулканизма / Л.С. Бородин, В.С. Попов, В.С. Гладких и др. М.: Наука, 1987. 238 с.

Геохимия магматизма / А.А. Кременецкий, Н.К. Дмитренко, С.В. Павленко и др. М.: Наука, 1982. 224 с.

- Геохимия мезозойских латитов Забайкалья / Л.В. Таусон, В.С. Антипин, М.Н. Захаров и др. Новосибирск: Наука, 1984. 215 с.
- Геохимия молибдена и вольфрама. М.: Наука, 1971. 128 с.
- Геохимия серебра в сульфидных месторождениях Центрального Казахстана и рудного Алтая / Х.А. Беспяев, Ю.С. Париков, Г.Б. Паталаха и др. Алма-Ата: Наука, 1975. 296 с.
- Геохимия тонкозернистых терригенных пород верхнего докембрия Северной Евразии / А.В. Маслов, А.Д. Ножкин, В.Н. Подковыров и др. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 274 с.
- Герасимовский В.И., Борисенко Л.А. Содержание рудных элементов (Pb, Zn, Mo, Ag) и бора в эффузивных породах Исландии // Геохронология и проблемы рудообразования. М.: Наука, 1977. С. 179–184.
- Герцен В.Г. К геохимии верхнерифейской карбонатной толщи Тимана и полуострова Канин // Геохимия осадочных формаций Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Сыктывкар, 1972. С. 24–33.
- Гершойг Ю.Г. Сидеритовая фация в железистых породах Криворожского бассейна // Вещественный состав и обогатимость железных руд. Вып. 5. М., 1965. С. 57–79.
- Гершойг Ю.Г. Вещественный состав и оценка обогатимости железных руд. М.: Недра, 1968. 200 с.
- Гладковский А.К., Огородников О.Н., Анфимов Л.В. Проблема происхождения геосинклинальных месторождений бокситов на Урале // Проблемы генезиса бокситов. М., 1975. С. 168–177.
- Гладковский А.К., Шарова А.К., Храмцов В.Н. Закономерности состава, происхождения и изменения мезо-кайнозойских месторождений бокситов азиатской части СССР // Закономерности формирования и размещения полезных ископаемых на Урале. Т. 3. Бокситы. Свердловск, 1964. С. 127–166.
- Глухан И.В., Серых В.И. Кларки песчаных пород Центрального Казахстана // Геохимия, 1999. № 9. С. 976–993.
- Глухан И.В., Серых В.И. Кларки алевролитов и аргиллитов Центрального Казахстана // Геохимия, 2000. № 9. С. 922–940.
- Глухан И.В., Серых В.И. Средние содержания химических элементов в карбонатных и кремнистых породах Центрального Казахстана // Геохимия, 2001. № 6. С. 607–620.
- Говоров И.Н., Мишкин М.А., Карсаков Л.П. и др. Основные черты геохимии нижнеархейских метабазитов и проблема протоконтинентальной коры Дальнего Востока // Металлогения Тихоокеанского рудного пояса. Владивосток, 1982. С. 77–85.
- Говоров И.Н., Мишкин М.А., Липкина М.И. и др. Распределение акцессорных элементов в породах фундамента Приморской металлогенической области // Вопросы геологии, геохимии и металлогении северо-западного сектора Тихоокеанского пояса. Владивосток, 1970. С. 159–165.
- Говоров И.Н., Недашковский П.Г., Левашов Г.Б. и др. Признаки и факторы геохимической специализации гранитоидов Дальнего Востока // Геохимические критерии потенциальной рудоносности гранитоидов. Иркутск, 1970. С. 83–145.
- Голдин Б.А., Давыдов В.П., Каримов Н.А., Мизин В.И. Липаритовые комплексы осевой зоны Северного Урала // Палеовулканизм Урала. Вулканические фации. Свердловск, 1975. С. 137–150.
- Головенок В.К. Литолого-геохимические особенности и условия образования Тепторгинской серии Байкальской горной области. М.: Недра, 1976. 144 с.
- Гончаров В.В. Огнеупорные глины Боровичско-Любытинского района. М.: Металлургиздат, 1952. 235 с.
- Горбачев О.В. Параамфиболиты и амфиболовые сланцы в карбонатных толщах докембрия // Проблемы осадочной геологии докембрия. Вып. 6. М., 1981. С. 62–70.
- Горбов А.Ф. Геохимия бора. Л.: Недра, 1976. 207 с.
- Горкун В.Н., Родионова Р.И., Федорченко В.И., Шилов В.Н. О распределении и накоплении некоторых малых элементов в лавах северной части хребта Вернадского на острове Парамушир (Курильские острова) // Петрохимические особенности молодого вулканизма. М., 1963. С. 89–103.

*Горожанина Е.И., Кузьмин С.А.* Редкоземельные элементы в базальтах островодужных комплексов Магнитогорского мегасинклиналя // Микроэлементы в магматических, метаморфических и рудных формациях Урала. Уфа, 1987. С. 10–23.

*Горошников Б.И.* Петрология высокоглиноземистых кристаллических пород докембрия Украины. Киев: Наук. думка, 1971. 210 с.

*Горощенко Л.Г.* Некоторые особенности минералогии пород гранулитовой формации Кольского полуострова в связи с их происхождением // Проблемы осадочной геологии докембрия. Вып. 3. М., 1971. С. 56–79.

*Грабежев А.И.* Ниобий, тантал, олово в гранитах различной степени редкометалльной продуктивности (Восточно-Уральское поднятие) // Редкие элементы в гранитоидах Урала. Свердловск, 1981. С. 24–42.

*Гречин В.И.* Кремнистые породы миоцена Западной Камчатки // Литология и полезные ископаемые, 1971. № 4. С. 117–123.

*Григорьев Н.А.* Распределение бериллия на земной поверхности. М.: Наука, 1984. 177 с.

*Григорьев Н.А.* Минеральный баланс химических элементов. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 130 с.

*Григорьев Н.А.* Введение в минералогическую геохимию. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 302 с.

*Григорьев Н.А.* Роль минералов ряда колумбит–танталит в качестве носителей ниобия и тантала в выветрелых гранитоидах Адуйского массива, Урал, Россия // Геохимия, 2000. № 8. С. 899–903.

*Григорьев Н.А.* О кларковом содержании химических элементов в верхней части континентальной коры // Литосфера, 2002. № 1. С. 38–60.

*Григорьев Н.А.* Средний минеральный состав осадочного слоя континентальной коры // Литосфера, 2003а. № 3. С. 43–53.

*Григорьев Н.А.* Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия, 2003б. № 7. С. 785–792.

*Григорьев Н.А.* Турмалин как носитель бора в верхней части континентальной коры // Урал. геол. ж., 2004. № 4. С. 113–122.

*Григорьев Н.А.* О концентрации масс золота в верхней части континентальной коры и роли самородного золота // Литосфера, 2006. С. 113–122.

*Григорьев Н.А.* Средний состав верхней части континентальной коры и масштабы максимальной концентрации химических элементов // Геология Урала и сопредельных территорий. Екатеринбург, 2007. С. 219–228.

*Григорьев Н.А., Бушляков И.Н., Покровский П.В. и др.* Распределение бериллия в районе гидротермальных редкометалльно-вольфрамовых проявлений // Геохимия, 1981. № 3. С. 386–392.

*Гроховская Т.Л., Шарков Е.В., Смолькин В.Ф. и др.* Платиноносность расслоенного интрузива горы Генеральской (Кольский полуостров) // Платина России. Т. 3. М., 1999. С. 153–161.

*Гуляева Л.А., Захарова Ф.А.* Галогены в нижнеюрских отложениях Колангуйского месторождения флюоритов Восточного Забайкалья // Микроэлементы в каустобиолитах и осадочных породах. М., 1965. С. 116–127.

*Гуляева Л.А., Лыгалова В.Н.* Бор в нижнемеловых отложениях Зезя-Буреинской впадины // Микроэлементы в каустобиолитах и осадочных породах. М., 1965. С. 3–10.

*Гуляева Л.А., Лыгалова В.Н.* Хлор, бром и йод в нижнекембрийских и докембрийских отложениях Иркутского амфитеатра // Малые и рассеянные элементы в осадочных породах и нефтях. М., 1970. С. 5–21.

*Гурбанов А.Г., Бубнов С.Н., Гольцман Ю.В. и др.* Петрогенезис и возраст вулканических образований Именновской свиты в разрезе Уральской сверхглубокой скважины по изотопным и геохимическим данным (интервал 0–4617 м) // Результаты бурения и исследований Уральской сверхглубокой скважины (СГ-4). Научное бурение в России. Вып. 5. Ярославль, 1999. С. 132–168.

*Гусев С.Г., Песков А.И.* Геохимия и условия образования офиолитов Восточного Забайкалья // Геохимия, 1996. № 8. С. 723–737.

- Гуткин Е.С. Карбонатные вмещающие толщи Петропавловского бассейна и их связь с бокситами // Закономерности формирования и размещения полезных ископаемых на Урале. Т. 3. Свердловск, 1964. С. 109–126.
- Гуткин Е.С. О геохимии галлия в бокситах // Геология палеозоя и мезозоя Урала и Зауралья: Тр. ИГГ УНЦ АН СССР. Вып. 22. Свердловск, 1975. С. 186–196.
- Гуткин Е.С., Добровольская Т.И., Сапронова З.Д. Некоторые особенности геологии и геохимии бокситов горного Крыма // Геология и геохимия бокситов, латеритов и генетически связанных с ними пород. Свердловск, 1976. С. 108–142.
- Гуткин Е.С., Хрусталева А.Д., Можжерин И.Г. Мугойское месторождение бокситов на Урале // Сов. геология, 1969. № 4. С. 82–96.
- Давлетов И.К., Шелков Е.Е., Соловьева В.В. Результаты экспериментального изучения формы нахождения золота в интрузивных породах // Докл. АН СССР, 1973. Т. 212, № 1. С. 202–204.
- Данченко Р.В., Чочия Г.Л. Типы кремнистых пород нефтегазоносных толщ Сахалина // Вест. МГУ. Сер. 4. Геология, 1983. № 1. С. 31–39.
- Даценко Н.М. Вещественный состав и классификация глин Роздольского месторождения // Геология месторождений самородной серы. М., 1969. С. 178–196.
- Дегенхардт Х. О геохимическом распределении циркония в литосфере // Геохимия редких элементов. М., 1959. С. 157–208.
- Дмитриев Ф.Л., Курочка В.П., Маевская Н.Д. и др. Давсонит в нижнекаменноугольных отложениях Припятской впадины в Белоруссии // Проблемы генезиса бокситов. М., 1975. С. 291–302.
- Дмитриева Н.В., Туркина О.М., Ножкин А.Д. Геохимические особенности метатерригенных пород Арзыбейского и Дербинского блоков неопротерозойского аккреционного пояса юго-западного обрамления Сибирского кратона: реконструкция источников сноса и условий образования осадков // Литосфера, 2006. № 3. С. 28–44.
- Дианова Т.В. Вулканогенные породы восточной части Павдинского района // Материалы по петрографии и геологии главной (западной) вулканогенной зоны восточного склона Среднего Урала. Свердловск, 1958. С. 3–137.
- Дмитриев Ю.И. Трапповый магматизм и гидротермальная минерализация р. Чоны // Сов. геология, 1959. № 10. С. 31–47.
- Додин Д.А. Платиноносные месторождения России: минералогия, геохимия, модели формирования // Платина России. Т. 4. М., 1999. С. 5–21.
- Додин Д.А., Чернышов Н.М., Полферов Д.В., Тарновецкий Л.Л. Платинометалльные месторождения мира. Т. 1. М.: Геоинформмарк, 1994. 280 с.
- Докембрий Анабаро-Алексского междуречья (Били-Уджинское поднятие) / Б.Р. Шпунт, Э.А. Шамшина, И.Г. Шаповалова и др. Новосибирск: Наука, 1976. 113 с.
- Доминиковский Г.Г. Петрография кристаллических сланцев средней части Ильменских гор // Ильменогорский комплекс магматических и метаморфических пород. Свердловск, 1971. С. 130–147.
- Држбациян Р.Т. Акцессорные элементы и минералы эффузивных образований Базумского хребта как индикаторы их металлогенической специализации // Акцессорные минералы и элементы как критерий комагматичности и металлогенической специализации магматических комплексов. М., 1965. С. 79–101.
- Дудина-Барковская Э.А., Юсупов Р.Г. Геохимия висмута в интрузивных породах Кураминских гор Средней Азии // Геохимия, 1976. № 3. С. 323–335.
- Дэли Р.О. Изверженные породы и глубины Земли. М.: ОНТИ, 1936. 591 с.
- Егоров И.Н., Гамалея Ю.Н., Милиц М.В. О распределении циркония в породах и минералах Улканского субщелочного массива // Геохимия, 1966. № 12. С. 1471–1477.
- Ежков Ю.Б., Левченко И.В. К геохимии бора в гранитоидах (на примере Чаткальского района, Центральный Тянь-Шань) // Геохимия, 1972. № 9. С. 1053–1062.
- Ермаков В.А. Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 233 с.
- Ермаков В.К. О составе и генезисе железистых кварцитов в докембрийских отложениях Южного Урала // Вопросы геологии Урала. Ч. 1. Свердловск, 1959. С. 67–80.

- Ермолаев Н.П., Величкин В.И., Аверина А.С., Лактионова Н.В.* Геохимические особенности гранитизации в Рудных горах // Геохимия, 1976. № 5. С. 696–707.
- Ерофеев В.С., Цеховский Ю.Г.* Парагенетические ассоциации континентальных отложений. М.: Наука, 1983. 193 с.
- Еськова Е.М.* К геохимии Nb и Ta в массивах нефелиновых сиенитов Вишневых гор // Геохимия, 1959. № 2. С. 131–139.
- Еськова Е.М., Жабин А.Г., Мухитдинов Г.Н.* Минералогия и геохимия редких элементов Вишневых гор. М.: Наука, 1964. 319 с.
- Ефимов А.А., Потапова Т.А.* О поведении редкоземельных и других следовых элементов при метаморфизме габбро-норитов Платиноносного пояса Урала // Ежегодник-2001 ИГТ УрО РАН. Екатеринбург, 2002. С. 228–232.
- Железисто-кремнистая формация докембрия Мариупольского рудного поля. М.: Недра, 1974. 150 с.
- Железисто-кремнистые формации Украинского щита. Т. 2. Киев: Наук. думка, 1978. 367 с.
- Жмодик С.М.* Геохимия радиоактивных элементов в процессе выветривания карбонатов, кислых и щелочных пород. Новосибирск: Наука, 1984. 143 с.
- Журавлев Р.С., Осипов Д.К.* Уран в основных породах Патына и Горной Шории // Геохимия, 1965. № 4. С. 490–494.
- Завьялов В.А., Мальцева О.С., Кононенко В.Д.* Золото в одном из девонских разрезов Притиманья // Микроэлементы в каустобиолитах и осадочных породах. М.: Наука, 1985. С. 100–106.
- Залайшкова Н.Е.* Закономерности распределения бериллия, лития и рубидия в гранитах Восточного Забайкалья // Междунар. геол. конгр., XXI сессия. Докл. сов. геол. Геохимические циклы. М., 1960. С. 110–120.
- Залманзон Э.С., Шишова Е.С.* Железо, марганец, фосфор и малые элементы в нижне-франкских отложениях Второго Баку // Докл. АН СССР, 1952. Т. 85, № 4. С. 835–837.
- Захаров М.Н., Гундобин Г.М., Легейдо В.А., Казьмин Л.А.* Золото и серебро в интрузиях верхнего мела и палеогена Северного Приохотья // Геохимия, 1977. № 10. С. 48–56.
- Злобин В.А.* Геохимические особенности рудовмещающих черносланцевых толщ Енисейского кряжа // Микроэлементный состав осадочных толщ как показатель условий их формирования. Новосибирск, 1989. С. 105–141.
- Злобин Б.И.* О формах нахождения меди в изверженных горных породах // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1969. Т. 93, вып. 5. С. 530–538.
- Злобин Б.И., Лебедев В.И.* Геохимические связи Li, Na, K, Rb, Tl в щелочной магме и их некоторое петрогенетическое значение // Геохимия, 1960. № 2. С. 87–103.
- Зорина С.О., Месхи А.М., Минько О.М. и др.* Основные черты мезозойского литогенеза и минерализации северо-востока Ульяновско-Саратовского прогиба (юго-запад Республики Татарстан) // Проблемы литологии, геохимии и рудогенеза осадочного процесса. Т. 1. М., 2000. С. 292–295.
- Зубарев А.И.* Трахитоидные ийолиты Хибинского массива в связи с локализацией апатит-нефелиновых месторождений // Сов. геология, 1978. № 12. С. 53–63.
- Зубков В.С., Петров Л.Л.* Фтор, бор, бериллий в юрских эффузивах Центрального Забайкалья // Вулканология и сейсмология, 1984. № 1. С. 50–63.
- Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Кн. 1. М.: Недра, 1994. 305 с.
- Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Кн. 2. М.: Недра, 1994. 303 с.
- Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Кн. 3. М.: Недра, 1996. 353 с.
- Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Кн. 4. М.: Недра, 1996. 409 с.
- Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Кн. 5. М.: Недра, 1997. 576 с.
- Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Кн. 6.: М.: Недра, 1997. 608 с.
- Иванов К.П.* Триасовая трапповая формация Урала. М.: Наука, 1974. 155 с.
- Иванов К.П., Иванов К.С., Коротеев В.А. и др.* Распределение микроэлементов в породах дифференцированной серии (на примере Тюменского силла) // Литосфера, 2006. С. 57–67.



- Иванов К.С.* Магматизм восточного борта Зилаирского синклиория // Магматические комплексы Среднего и Южного Урала. Свердловск, 1982. С. 69–74.
- Иванов К.С., Олерский В.П., Копанев В.Ф.* Ультракалийевые липаритовые порфиры покровского комплекса (Средний Урал) // Геосинклинальный вулканизм Урала и колчеданность вулканических формаций. Свердловск, 1980. С. 131–139.
- Иванова Г.Ф., Бутузова Е.Г.* Особенности распределения вольфрама, олова и молибдена в гранитах Восточного Забайкалья // Геохимия, 1968. № 6. С. 689–700.
- Игумнова И.П., Киселева М.Н.* Вещественный состав и обогащенность железистых пород Первомайского участка Криворожского Бассейна // Вещественный состав и обогащенность железных руд. Вып. 5. М., 1965. С. 112–130.
- Илларионов А.А.* Петрография и минералогия железистых кварцитов Михайловского месторождения Курской магнитной аномалии. М.: Наука, 1965. 164 с.
- Ильин В.А., Сыромятина Н.Д.* Минералогические особенности четвертичных отложений и их зависимость от подстилающих коренных пород // Четвертичная геология и геоморфология восточной части Балтийского щита. Л., 1972. С. 102–108.
- Ипатов М.М., Степанова Т.И.* Конгломераты Восточного Саяна и перспективы их золотоносности // Золотоносные конгломераты Сибирской платформы. М., 1966. С. 94–116.
- Ипатьева И.С.* Акцессорные минералы гранитоидов Верхне-Индигоирского района (Восточная Якутия) // Акцессорные минералы изверженных пород. М., 1968. С. 173–180.
- Ипатьева И.С.* Акцессорные минералы позднемезозойских гранитоидов северо-востока СССР. Новосибирск: Наука, 1976. 110 с.
- Ипатьева И.С., Соловьев В.И.* Акцессорные минералы вулканических и интрузивных пород Березовской зоны (северо-восток СССР) // Акцессорные минералы магматических и метаморфических пород. М., 1982. С. 111–118.
- Ичетовкин Н.В.* К эволюции магматического расплава в процессе игнимбритовых извержений в Гайчанской палеокальдере (Охотско-Чукотский вулканогенный пояс) // Минералогия, петрография и геохимия изверженных и осадочных пород северо-востока СССР. Магадан, 1978. С. 31–42.
- Кабанова Е.С., Скосырева М.В., Солодов Н.А.* Геохимия и минералогия тантала и ниобия // Итоги науки, 1982. Т. 12. 176 с.
- Каперская Ю.Н.* Распределение К, Rb, Tl в метаморфических породах и гранитоидах Байкальской глыбы // Геохимия, 1977. № 1. С. 94–103.
- Карапетян С.Г., Меликсетян Б.М.* Геохимические особенности перлитов месторождений Армянской ССР // Перлиты. М.: Наука, 1981. С. 97–114.
- Карбонатные породы Украинского щита / Н.И. Половко, Р.И. Сироштан, Н.М. Бондарева и др. Киев: Наук. думка, 1975. 151 с.
- Карнаухова Г.А.* Геохимический состав воды и донных отложений Братского водохранилища // Геохимия, 1999. № 1. С. 51–56.
- Карпухина В.С., Баранов Э.Н.* Формы нахождения элементов-индикаторов в эндогенных геохимических ореолах колчеданных месторождений // Геохимия, 1981. № 8. С. 1136–1148.
- Карякин Л.И.* Минеральный состав песков харьковского яруса в пределах УССР и их генезис // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1951. № 3. С. 191–201.
- Карякин Л.И.* Минералогический состав кремнисто-глинистых пород харьковского яруса в пределах УССР // Минерал. сб. Львов. геол. о-ва, 1954. № 8. С. 175–192.
- Катченков С.М., Флегонтова Е.И.* Малые элементы в породах девона Волго-Уральской области // Докл. АН СССР, 1955. Т. 100, № 4. С. 749–752.
- Катченков С.М.* Среднее содержание некоторых малых химических элементов в главных типах осадочных пород // Химия земной коры. Т. 2. М.: Наука, 1964. С. 391–397.
- Кашин В.К.* Цинк в основных компонентах ландшафтов бассейна озера Байкал // Геохимия, 1999. № 1. С. 57–68.
- Каширин К.Ф., Легейдо В.А.* Закономерности распределения олова в гранитоидах конкудеро-мамаканского комплекса (Северо-Байкальское нагорье) // Геохимия, 1967. № 4. С. 418–424.

*Кетрис М.П., Иванова Т.И., Юдович Я.Э. и др.* Геохимия смешанных терригенно-карбонатных пород из пермских отложений Средней Печоры // Геохимия осадочных формаций и подземных вод Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Сыктывкар, 1972. С. 91–101.

*Курсанов Н.В., Власов В.В., Сабитов А.А.* О минералогическом составе бентонитовых глин Нурлатского месторождения в Татарской АССР // Литология и полез. ископаемые, 1965. № 3. С. 96–104.

*Кисин А.Ю.* Месторождения рубинов в мраморах (на примере Урала). Свердловск: УрО АН СССР, 1991. 130 с.

*Коваленко В.И., Легейдо В.А., Петров Л.Л., Пополитов Э.И.* Олово и бериллий в щелочных гранитоидах (пример рассеяния резко повышенных концентраций олова и бериллия в гранитах) // Геохимия, 1968. № 9. С. 1078–1087.

*Коваленко В.И., Пополитов Э.И.* Петрология и геохимия редких элементов щелочных и гранитных пород северо-восточной Тувы. М.: Наука, 1970. 258 с.

*Коваль П.В., Антипин В.С., Цыпуков Ю.П., Смирнов В.Н.* Геологическое строение и вещественный состав Бага-Хентейского батолита (МНР) // Геология и геофизика, 1978. № 5. С. 68–78.

*Коган Е.И., Названова В.А., Солодов Н.А.* Рубидий и цезий. М.: Наука, 1971. 336 с.

*Козлов В.Д.* Геология и геохимия палеозойских гранитоидов Ундино-Газимурского района (Восточное Забайкалье) // Геохимия редких элементов в магматических комплексах Восточной Сибири. М., 1972. С. 48–97.

*Козлов Н.Е., Иванов А.А.* О двух типах метаандезитов Лапландского гранулитового пояса // Геохимия, 1995. № 10. С. 1512–1515.

*Козлов В.Д., Роцупкина О.С.* Распределение молибдена в палеозойских гранитоидах Ундино-Газимурского района (Восточное Забайкалье) // Геохимия, 1965. № 12. С. 1459–1468.

*Кокарев Г.Н., Смирнов А.А., Шуляева Л.Н.* Акцессорные минералы докембрийских пород Макбала (Киргизский хребет) // Акцессорные минералы докембрия. М., 1986. С. 151–152.

*Коконбаев К.Дж., Туровский Д.С.* Закономерности распределения акцессорных минералов и их геохимические особенности в гранито-гнейсовых куполах Тянь-Шаня // Геохимия магматических и метаморфических образований Тянь-Шаня. Фрунзе, 1989. С. 51–71.

*Коллерсон К.Д., Джессо К., Бриджуотер Д.* Геологическая эволюция архейского гнейсового комплекса: Восточный Лабрадор // Ранняя история Земли. М., 1980. С. 245–263.

*Кольцова В.В., Яржемский Я.Я.* Материалы к петрографии пермских соляных отложений некоторых районов Волгоградского Поволжья // Минералого-петрографические исследования галогенных отложений. Л., 1969. С. 108–123.

*Константинов М.М., Костин А.В., Сидоров А.А.* Геология месторождений серебра. Якутск: Сахаполиграфиздат, 2003. 281 с.

*Константиновский А.А.* Перспективы обнаружения комплексных (золото, платиноиды) палеороссыпей на востоке Балтийского щита // Литология и полез. ископаемые, 2005. № 1. С. 12–24.

*Корнев Т.Я., Даценко В.М., Бозин А.В.* Рифейский магматизм и колчеданно-полиметаллическое оруденение Енисейского кряжа. М.: Недра 1974. 131 с.

*Коробейников А.Ф.* Особенности распределения золота в породах черносланцевых формаций // Геохимия, 1985. № 12. С. 1747–1757.

*Коробейников А.Ф.* Геолого-геохимическая модель формирования золоторудных месторождений в офиолитовых поясах // Геохимия, 1992. № 2. С. 178–188.

*Коробейников А.Ф.* Геохимия золота в габбро-плагиогранитных системах складчатых структур // Геохимия, 1997. № 5. С. 513–520.

*Коробейников А.Ф.* Комплексные месторождения благородных и редких металлов. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 326 с.

*Коробейников А.Ф., Гончаренко А.И.* Золото в офиоритовых комплексах Алтае-Саянской складчатой области // Геохимия, 1986. № 1. С. 49–64.

*Коробейников А.Ф., Домаренко В.А., Владимирова Е.В., Рихванов Л.П.* Золото в посторогенных габбро-сиенит-гранитных интрузивах Кузнецкого Алатау // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1983. № 12. С. 107–119.

*Коробейников А.Ф., Кравченко В.М., Пикареня Д.С. и др.* Геохимический фон и аномалии благородных металлов в верхнеархейских вулканогенно-терригенных формациях зеленокаменных структур Алданского и Украинского щитов // *Геохимия*, 1986. № 12. С. 1148–1156.

Корово-мантийное оруденение в салических блоках эвгеосинклинали / В.Н. Сазонов, Б.А. Попов, Н.А. Григорьев и др. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 1989. 113с.

*Коротеев В.А., Лепезин Г.Г.* Принципиально новые пути решения минерально-сырьевой базы алюминиевой промышленности России и технологии процессов производства алюминия // Матер. IX горно-промышленного съезда. Электронная версия. Екатеринбург, 2006.

*Косалс Я.А.* Геохимия амазонитовых апогранитов. Новосибирск: Наука, 1976. 190с.

*Косалс Я.А., Мазуров М.П.* Поведение редких щелочей, бора, фтора и бериллия при становлении Биту-Джидинского гранитного массива (ю.-з. Прибайкалье) // *Геохимия*, 1968. № 10. С. 1238–1249.

*Косалс Я.А., Мазуров М.П.* Поведение молибдена, вольфрама, олова, ниобия и тантала в процессе становления Биту-Джидинского гранитного массива (ю.-з. Прибайкалье) // *Геохимия*, 1970. № 6. С. 731–743.

*Косалс Я.А., Недашковский П.Г., Петров Л.Л., Серых В.И.* Закономерности распределения бериллия в плагиоклазах гранитоидов // *Геохимия*, 1973. № 7. С. 998–1013.

*Костин В.А.* Геолого-геохимические особенности верхнеархейской вулканоплутонической плагиогранитной формации (Восточная Карелия) // Закономерности концентрации рудных элементов в гранитоидных формациях Карело-Кольского региона. Апатиты, 1985. С. 45–52.

*Костицын Ю.А., Волков В.Н., Журавлев Д.З.* Редкие элементы и эволюция гранитного расплава (на примере Раумидского массива, Ю. Памир) // *Геохимия*, 2007. № 10. С. 1057–1069.

*Котова Л.Н.* Диаспоровые конкреции в вулканических породах // Рудные конкреции и конкреции рудоносных формаций. Л., 1976. С. 53–54.

*Кравченко Г.Л.* К вопросу о генезисе железистых кварцитов Мангушской магнитной аномалии (Приазовье) // Проблемы образования железистых пород докембрия. Киев: Наук. думка, 1969. С. 123–129.

*Кременецкий А.А., Гладких В.С.* Низкокальциевые толеитовые базальты – индикатор эволюции палеогеодинамических обстановок и прогноза глубинного углеводородного сырья (по данным Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6) // *Геохимия*, 1997. № 6. С. 609–617.

*Кременецкий А.А., Липидус А.В., Скрябин В.Ю.* Геолого-геохимические методы глубинного прогноза полезных ископаемых. М.: Наука, 1990. 223 с.

*Кременецкий А.А., Лебедева Л.И., Солодов Н.А.* Цезиеносность вулканогенных образований СССР // *Геохимия*, 1973. № 4. С. 504–515.

*Кременецкий А.А., Овчинников Л.Н.* Геохимия глубинных пород. М.: Наука, 1986. 262с.

*Кренделев Ф.П., Бобров В.А.* Кларковые содержания урана, тория, калия в корях выветривания кислых изверженных и метаморфических пород Енисейского кряжа // *Геохимия и минералогия радиоактивных элементов Сибири*. Новосибирск, 1970. С. 105–155.

*Кромская К.М.* Распределение никеля и кобальта в минералах габброидных пород Бельтауского массива (Западный Узбекистан) // Зап. Узб. отд. Всесоюз. минерал. о-ва, 1973. Вып. 26. С. 185–188.

*Крылова Г.И., Кокарев Г.Н., Сучкова Е.М., Хетчиков Л.Н.* Видовой состав и распространенность акцессорных минералов в докембрийских породах хрусталеносных районов Урала // Акцессорные минералы докембрия. М., 1986. С. 45–85.

*Кудрявцева С.И., Ильина И.М.* Опыт учета элементов-примесей в оловянно-полиметаллических рудах на примере Шерловогорского месторождения // Геология месторождений цветных металлов складчатого обрамления Сибирской платформы. Новосибирск, 1982. С. 106–109.

*Кузнецов А.П.* Терригенная минералогия пород фанерозоя бассейна Курской магнитной аномалии // Литология и полез. ископаемые, 1992. № 2. С. 90–1.

*Кузнецов В.А.* Геохимия аллювиального литогенеза. Минск: Наука и техника, 1973. 208 с.

Кузнецова С.Я. Геохимия серы в породах Ловозерского щелочного массива // Геохимия, 1976, № 1. С. 36–46.

Кузнецов Н.Б., Соболева А.А., Удоратина О.В. и др. Доуральская тектоническая эволюция северо-восточного и восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. Ст. 1. Протоуралиды, тиманиды и доордовикские гранитоидные вулканогенно-плутонические ассоциации Севера Урала и Тимано-Печорского региона // Литосфера, 2006, № 4, С. 3–23.

Кузьмин М.И. Геохимия магматических пород фанерозойских подвижных поясов. Новосибирск: Наука, 1985. 199 с.

Кузьмин М.И., Альмухамедов А.И. Особенности вещественного состава коры Уральского палеоокеана на примере офиолитов Южных Мугождар // Геохимия магматических пород современных и древних активных зон. Новосибирск, 1987. С. 148–157.

Кузьмин М.И., Антипин В.С. Геохимическая характеристика мезозойских гранитоидов Восточного Забайкалья // Геохимия редких элементов в магматических комплексах Восточной Сибири. М.: Наука, 1972. С. 132–185.

Куц В.П., Мищенко В.С. Функции распределения содержаний лития, рубидия и их некоторых минералов-носителей в гранитах Каменных могил и Екатериновки // Геохимия, 1963, № 12. С. 1124–1139.

Лазур О.Г., Нестоянова О.А., Новицкий И.П., Чайка В.М. Вулканизм зеленокаменных поясов. М.: Наука, 1988. 168 с.

Ламберт Р.Ст.Дж., Холланд Дж.Г. Геохимия гнейсов Амисток. Предварительные наблюдения // Ранняя история Земли. М., 1980. С. 201–212.

Ларичев А.И., Матвиенко Н.И., Чеканов В.И., Дыхан С.В. Литолого-геохимическая характеристика нефтегазоносных разрезов Катангской седловины // Микроэлементный состав осадочных толщ как показатель условий их формирования. Новосибирск, 1989. С. 53–66.

Ларсен Е.С., Фейр Д., Готтфрид Д., Смит В.Л. Уран в магматической дифференциации // Геология атомных сырьевых материалов. М., 1956. С. 53–72.

Лебедев В.И., Нагайцев Ю.В. Элементы-примеси метаморфических пород как источник рудного вещества некоторых месторождений // Геохимия, 1980, № 11. С. 1640–1649.

Лебедева Л.И. Вулканические стекла Забайкалья // Перлиты. М., 1981. С. 51–70.

Лебедева Л.И., Шаткова Л.Н. Распределение лития, рубидия, цезия в вулканических породах кислого состава // Геохимия, 1975, № 4. С. 576–583.

Левин В.Я. Петрология Ильменогорского комплекса // Вопросы петрологии гранитоидов Урала. Сб. № 2. (Тр. ИГГ УФААН СССР. Вып. 93). Свердловск, 1972. С. 130–154.

Леонова Л.Л. Распределение тория в минералах гранитоидов Сусамырского батолита (Ц. Тянь-Шань) // Геохимия, 1962, № 6. С. 490–496.

Леонова Л.Л., Кирсанов И.И. Геохимия базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // Геохимия, 1974, № 6. С. 875–884.

Леонова Л.Л., Легейдо В.А. Фазовое распределение олова в четвертичных вулканитах Камчатки и Курильских островов // Геохимия, 1975, № 10. С. 1452–1458.

Леонова Л.Л., Погиблова Л.С. Уран в минералах пород интрузии гор Кызыл-Омпул (Северная Киргизия) // Геохимия, 1961, № 10. С. 901–906.

Леонова Л.Л., Ренне С.О. О распределении урана, тория и калия в однородных гранитах // Геохимия, 1964, № 8. С. 788–794.

Леонова Л.Л., Удальцова Н.И. U, Th, Li, Rb, и Cs в вулканических породах Курильских островов и Камчатки // Геохимия, 1970, № 11. С. 1329–1334.

Леонова Л.Л., Удальцова Н.И. Редкие элементы в вулканических породах Курильских островов // Вулканизм и глубины Земли: Матер. III Всесоюз. вулканол. совещ. М.: Наука, 1971. С. 178–181.

Леонова Л.Л., Удальцова Н.И., Иванов В.В. Радиоактивные (U, Th) и редкие щелочные элементы (Li, Rb, Cs) в породах Карымского вулкана (Камчатка) // Там же. С. 181–185.

Ли А.Ф., Брадинская Е.М. Методика минералогического анализа силлиманитсодержащих проб // Сб. науч. тр. Иргередмет. Вып. 8. Иркутск, 1959. С. 64–73.

*Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н.* Палеозойский гранитоидный магматизм Западного Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1976. 141 с.

Литология и петрохимия осадочных пород в ранних зонах метаморфизма / А.А. Савельев, В.Я. Хильтова, И.К. Шулешко и др. Л.: Наука, 1974. 192 с.

*Лобанова В.В.* Петрография соляных отложений Челкарского поднятия // Минералогическо-петрографические исследования галогенных отложений. Л., 1969. С. 3–45.

*Лутц Б.Г.* Химический состав континентальной коры и верхней мантии Земли. М.: Наука, 1975. 167 с.

*Ляхович В.В.* Акцессорные минералы эффузивных и субэффузивных пород // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1963. № 12. С. 80–90.

*Ляхович В.В.* Акцессорные минералы гнейсов // Минерал. сб. Львов. гос. ун-та, 1966. Вып. 2. № 20. С. 199–208.

*Ляхович В.В.* Акцессорные минералы в гранитоидах Советского Союза. М.: Наука, 1967. 448 с.

*Ляхович В.В.* Акцессорные минералы. М.: Наука, 1968. 275 с.

*Ляхович В.В., Гурбанов А.Г.* Геохимия и условия становления Эльджуртинского массива (Северный Кавказ) // Геохимия, 1992. № 6. С. 800–812.

*Ляхович В.В., Чирвинская А.Д.* Акцессорные минералы в гранитоидах Тырны-Ауза и их петрогенетическое значение // Тр. ИМГРЭ, 1961. Вып. 7. С. 156–181.

Магматические горные породы. Кислые и средние породы / О.А. Богатиков, С.В. Богданова, А.М. Борсук и др. М.: Наука, 1987. 374 с.

*Маккелви В.Е.* Распространенность и распределение фосфора в литосфере // Фосфор в окружающей среде. М., 1977. С. 24–46.

*Макрыгина В.А., Бакшеев С.А., Смирнова Е.В.* Редкоземельные элементы в процессах метаморфизма и гранитизации умеренных давлений // Геохимия, 1980. № 2. С. 163–174.

*Макрыгина В.А.* Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма умеренных и низких давлений. Новосибирск: Наука, 1981. 200 с.

*Макрыгина В.А., Петров Б.В.* Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. Новосибирск: Наука, 1975. 342 с.

*Макрыгина В.А., Петрова З.И.* Геохимия мигматитов и гранитоидов Приольхонья и острова Ольхон (Западное Прибайкалье) // Геохимия, 1996. № 7. С. 637–649.

*Макрыгина В.А., Смирнова В.В.* Редкоземельные элементы в минералах Миня-Абчадского мигматитового комплекса (Северное Прибайкалье) // Геохимия, 1984. № 9. С. 1293–1306.

*Макрыгина В.А., Петрова З.И., Гантимурова Т.П.* Андезитовый магматизм и его место в геологической истории Приольхонья (Западное Прибайкалье) // Геохимия, 2000. № 12. С. 1266–1279.

*Макрыгина В.А., Петрова З.И., Конева А.А.* Геохимия основных кристаллических сланцев Приольхонья и о-ва Ольхон (Западное Прибайкалье) // Геохимия, 1992. № 6. С. 771–786.

*Макрыгина В.А., Петрова З.И., Конева А.А.* Геохимия метакarbonатных пород Приольхонья и острова Ольхон (Западное Прибайкалье) // Геохимия, 1994. № 10. С. 1437–1450.

*Максимов А.П., Иванов Б.В.* Физико-химические условия кристаллизации и генезиса андезитов (на примере Ключевской группы вулканов). М.: Наука, 1986. 158 с.

*Малиновский А.И.* Псефиты молассы Олюторского прогиба Восточной Камчатки // Литогенез и рудообразование в древних и современных морских бассейнах Дальнего Востока. Владивосток, 1990. С. 55–59.

*Малиновский А.И.* Состав и обстановка накопления нижнемеловых терригенных пород бассейна р. Кемы (Восточный Сихоте-Алинь) // Литология и полез. ископаемые, 2005. № 5. С. 495–514.

Марганцевое рудообразование на территории СССР. М.: Наука, 1984. 293 с.

*Маркс В.А.* Метаморфизм альбит-эпидот-амфиболитовой фации горных пород зеленокаменной зоны в Верхне-Уфалейском районе на Среднем Урале // Метаморфизм горных пород главной вулканогенной зоны Урала. М., 1969. С. 120–207.

*Маслов А.В., Ииерская М.В.* Обстановка накопления терригенных отложений верхнего венда Волго-Уральской области: Старопетровская свита Шкаповско-Шиханской впадины // Литосфера, 2005. № 1. С. 41–69.

*Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Ронкин Ю.Л., Мизенс Г.А. и др.* Пепловые туфы в отложениях сыльвицкой серии верхнего венда (Кваркушско-Каменогорский мегантиклинорий, Средний Урал) // Литосфера, 2006. № 3. С. 45–70.

*Маслов А.В., Крупенин М.Т., Петров Г.А. и др.* Некоторые геохимические особенности и условия образования тонкозернистых терригенных пород серебрянской и сыльвицкой серий Среднего Урала // Литосфера, 2007. № 2. С. 3–28.

*Маслов А.В., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т. и др.* Нижнерифейские тонкозернистые алюмосиликокластические осадочные образования Башкирского мегантиклинория на Южном Урале: состав и эволюция источников сноса // Геохимия, 2004. № 6. С. 648–669.

Медный пояс Северной Родезии. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 472 с.

*Мейсон Б.* Основы геохимии. М.: Недра, 1971. 311 с.

*Мельникова Г.Б.* Петрология андезитов главной вулканогенной зоны Урала // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1981. № 11. С. 34–44.

Метаморфические комплексы восточной окраины и склона Украинского щита / В.В. Закруткин, Е.А. Кулиш, А.В. Зайцев и др. Киев: Наук. думка, 1990. 252 с.

*Механошин А.С., Глазунов А.М., Бурмакина Г.В.* Геохимия и рудоносность метагабброидов Восточного Саяна. Новосибирск: Наука, 1986. 102 с.

*Механошин А.С.* Геохимия протерозойских вулканитов Восточного Саяна // Геохимия магматических пород современных и древних активных зон. Новосибирск, 1987. С. 109–121.

*Мизенс Г.А., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Попова О.Ю.* Редкие и редкоземельные элементы в девонских обломочных комплексах Магнитогорской мегазоны Южного Урала // Геохимия, 2006. № 5. С. 501–521.

*Мило Ж.* Минералогия глин. Л.: Недра, 1968. 360 с.

*Миловский А.В., Матвеева С.С., Леоненко Е.И.* Гранитизация горных пород. М.: Изд-во МГУ, 1985. 213 с.

Минералогия гидротермальных месторождений бериллия / А.И. Гинзбург, И.И. Куприянова, М.И. Новикова и др. М.: Недра, 1976. 196 с.

Минералогия траппов юга Сибирской платформы / Г.Д. Феоктистов, З.Ф. Ушаповская, Е.К. Васильев и др. Новосибирск: Наука, 1975. 87 с.

Минералы. Справочник. Т. 2. Вып. 3. М.: Наука, 1967. 676 с.

*Миц М.В., Цюнь О.В.* Геодинамическая обстановка позднеархейского вулканизма на северо-востоке Балтийского щита, Кейвы, Кольский полуостров // Геохимия, 1997. № 3. С. 243–259.

*Мирская Д.Д.* О протосоставе пород раннедокембрийских орогенных формаций // Геохимия и условия формирования осадочных толщ докембрия Кольского полуострова. Апатиты, 1980. С. 31–42.

*Мнацаканян А.Х.* Акцессорно-минералогические и геохимические особенности меловых вулканических серий Северной Армении как индикаторы комагматичности и металлогенической специализации вулканических комплексов // Акцессорные минералы и элементы как критерий комагматичности и металлогенической специализации магматических комплексов. М., 1965. С. 39–78.

*Могаровский В.В.* Геохимия редких элементов интрузивных пород Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1987. 295 с.

*Моисеенко В.Г.* Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 304 с.

*Моисеенко В.Г., Михайлов М.А., Сахно В.Г.* Поведение золота и серебра при осадконакоплении, вулканизме и метаморфизме. Новосибирск: Наука, 1974. 102 с.

*Морозов О.А., Ростовцева Ю.В., Шапиро М.Н.* Верхнемеловые песчаники полуострова Камчатский Мыс (Восточная Камчатка) – продукты размыва континентальной коры: новые данные // Литология и полез. ископаемые, 1996. № 3. С. 301–313.

Морозов С.Г., Иванова Т.В., Андреев Ю.В. Особенности химического состава и генезис осадочных пород верхнего протерозоя востока Русской плиты // Геохимия платформенных и геосинклинальных осадочных пород и руд. М., 1983. С. 40–48.

Мыскова Т.А., Милькович., Львов А.Б., Миллер Ю.В. Происхождение чупинских гнейсов Беломорья в свете новых литолого-геохимических данных // Литология и полез. ископаемые, 2000. № 6. С. 653–664.

Молошаг В.И., Викентьев И.В. Минералогическая интерпретация результатов рационального анализа золота в рудах колчеданных месторождений Урала // Урал. геол. ж., 2003. № 5. С. 91–110.

Мушкин И.В., Ярославский Р.И., Коцюба А.С. О поведении золота при эклогитизации гнейсов гранулитовой фации (на примере ксенолитов в дайках щелочных базальтоидов Южного Тянь-Шаня) // Геохимия, 1974. № 8. С. 1172–1178.

Набоко С.И. Петрохимические особенности молодых и современных лав Камчатки // Петрохимические особенности молодого вулканизма. М., 1963. С. 24–34.

Найбородин В.И., Колесниченко П.П., Кулешова В.И. Закономерности распределения серебра в породах Магаданского батолита // Геохимия, 1981. № 1. С. 142–147.

Найбородин В.И., Паланджан С.А. Геохимия серебра в офиолитовых комплексах Корякского нагорья // Геохимия, 1981. № 6. С. 917–926.

Наркелюн Л.Ф., Салихов В.С., Трубочев А.И. Медистые песчаники и сланцы мира. М.: Недра, 1983. 414 с.

Наумов В.А., Гурин А.П. Распределение ванадия, хрома, кобальта, никеля и меди в дифференцированной интрузии палагонитовых траппов в верхнем течении Нижней Тунгуски // Геохимия, 1967. № 2. С. 214–220.

Недашковский П.Г. Акцессорные минералы разнотипных гранитоидов Дальнего Востока // Акцессорные минералы магматических и метаморфических пород. М., 1982. С. 73–83.

Недашковский П.Г., Дербаремдикер М.М., Славкина С.П. и др. Распределение акцессорных элементов в гранитоидах Улканского массива // Геохимические циклы Дальнего Востока. Владивосток, 1969. С. 65–76.

Недашковский П.Г., Стрижкова А.А., Дербаремдикер М.М. Особенности состава и условий формирования оливинсодержащих гранит-порфиров Усть-Микулинского штока (Центральный Сихоте-Алинь) // Вопросы геологии, геохимии и металлогении северо-западного сектора Тихоокеанского пояса. Владивосток, 1970. С. 132–134.

Некрасов И.Я. Геохимия олова и редких элементов Верхоянско-Чукотской складчатой области. М.: Наука, 1966. 380 с.

Нестеренко Г.В., Альмухамедов А.И. Геохимия дифференцированных траппов (Сибирская платформа). М.: Наука, 1973. 198 с.

Нестеренко Г.В., Беляев Ю.И., Фам Фунг Фи. Серебро в процессе эволюции основных пород // Геохимия, 1969. № 2. С. 162–169.

Нестеренко Г.В., Фролова Л.П. Литий и рубидий в траппах // Геохимия, 1965. № 3. С. 343–347.

Никитин И.А., Мельников П.Н. Геохимия отложений венда Центральной части Сибирской платформы // Микроэлементный состав осадочных толщ как показатель условий их формирования. Новосибирск, 1989. С. 67–82.

Никулова Н.Ю., Ефанова Л.И., Швецова И.В., Казачкин М.Ю. Золото в терригенных породах нижнего ордовика на Приполярном Урале // Урал. геол. ж., 2003. № 5. С. 77–90.

Ножкин А.Д., Гавриленко В.А. Золото и радиоактивные элементы в полифациальных отложениях верхнего докембрия. Новосибирск: Наука, 1976. 190 с.

Нокколдс С.Р., Митчелл Р.Л. Геохимия некоторых каледонских интрузивных пород: исследование связи между основными и рассеянными элементами изверженных пород и их минералов // Редкие элементы в изверженных горных породах и минералах. М., 1952. С. 295–366.

Носырев И.В., Робул В.М., Голуб П.Я. и др. Акцессорные минералы метаморфических пород Украинского щита // Акцессорные минералы докембрия. М., 1986. С. 34–45.

Нырков В.А. Минералогический состав аргиллитов Донбасса // Вопросы минералогии осадочных образований. Кн. 3–4. Львов, 1956. С. 315–329.

- Овчинников Л.Н.* Прикладная геохимия. М.: Недра, 1990. 248 с.
- Овчинников Л.Н., Полетаев И.А., Рябенко В.Е. и др.* О цезиевом биотите как возможном источнике промышленного получения цезия и других щелочных металлов // Докл. АН СССР, 1972. Т. 206, № 3. С. 698–701.
- Одикадзе Г.Л.* Некоторые особенности распределения редких и рудных элементов в Эльджуртинском интрузивном массиве Кабардино-Балкарской АССР // Геохимия, 1968. № 10. С. 1211–1217.
- Одикадзе Г.Л.* О содержании калия, рубидия, цезия и фтора в некоторых вулканогенных образованиях Кавказа // Геохимия, 1973. № 7. С. 1089–1094.
- Ожогин В.А.* Некоторые литологические особенности метаморфических толщ, вмещающих верхнепонойские щелочные граниты (Кольский полуостров) // Проблемы осадочной геологии докембрия. Вып. 3. М., 1971. С. 44–55.
- Озерова Н.А., Унанова О.Г.* О распределении ртути в лавах действующих вулканов Камчатки и Курильских островов // Геология рудных месторождений, 1965. № 1. С. 58–74.
- Онис Х., Санделл Э.* Геохимия мышьяка // Геохимия редких элементов. М., 1959. С. 435–492.
- Онис Х., Санделл Э.* Заметки по геохимии сурьмы // Там же. С. 493–510.
- Осипов Д.К., Журавлев Р.С.* Распределение урана и тория в щелочных магматических породах Кузнецкого Алатау // Геохимия и минералогия радиоактивных элементов Сибири. Новосибирск, 1970. С. 72–104.
- Остапенко Н.С.* Основные факторы и механизмы эндогенной концентрации золота (на примере месторождений Приамурья): Дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Благовещенск, 2007. 470 с.
- Павленко А.С., Филиппов Л.В., Орлова Л.П.* Гранитоидные формации центрально-азиатского складчатого пояса. М.: Наука, 1974. 223 с.
- Павленко А.С., Геворкян Р.Г., Асланян Р.Т. и др.* К вопросу об алмазности гипербазитовых поясов Армении // Геохимия, 1974. № 3. С. 366–379.
- Панков Ю.Д.* Ильменогорский метаморфический комплекс // Ильменогорский комплекс магматических и метаморфических пород. Свердловск, 1971. С. 61–130.
- Парначев В.П.* Магматизм и осадконакопление в позднедокембрийской истории Южного Урала: Дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Свердловск, 1987. 520 с.
- Патык-Кара Н.Г., Долгополова Л.П., Сердобова Л.И.* Формы нахождения и баланс распределения элементов-индикаторов в оловянных россыпях // Литология и полез. ископаемые, 1990. № 2. С. 23–35.
- Пачаджанов Д.Н.* Геохимия красноцветных меловых отложений Таджикской депрессии. М.: Наука, 1981. 244 с.
- Пачаджанов Д.Н.* Распространенность платиноидов в некоторых горных породах и рудах Таджикистана // Докл. АН СССР, 1985. Т. 280, № 6. С. 1422–1424.
- Пачаджанов Д.Н., Адамчук И.П.* Элементы-индикаторы осадочного процесса // Геохимия платформенных и геосинклинальных осадочных пород и руд. М.: Наука, 1983. С. 189–203.
- Пачаджанов Д.Н., Адамчук И.П., Мельникова Н.Д., Корсун В.И.* К геохимии висмута в осадочном процессе // Геохимия, 1975. № 10. С. 1516–1532.
- Первухина А.Е., Дробинина Н.Я.* Карбонатные породы Тувинской автономной области. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 79 с.
- Петров Б.В., Макрыгина В.А.* Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. Новосибирск: Наука, 1975. 342 с.
- Петров В.Г.* Докембрий Западного обрамления Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1982. 206 с.
- Петров Р.П.* Анортотеллит с верховьев реки Галов (северо-восток СССР) // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. 1945. Ч. 74. Вып. 3. С. 205–214.
- Петрова З.И.* Петролого-геохимическая характеристика Джидинского интрузивного комплекса // Геохимия редких элементов в магматических комплексах Восточной Сибири. М., 1972. С. 5–47.



- Петрова З.И., Левицкий В.И.* Петрология и геохимия гранулитовых комплексов Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1984. 200 с.
- Петрова З.И., Макрыгина В.А.* Геохимия гранат-биотитовых и биотитовых плагиогнейсов Приольхонья и о-ва Ольхон (Западное Прибайкалье) // Геохимия, 1994. № 5. С. 659–670.
- Петрова З.И., Смирнова Е.В.* Редкоземельные элементы в процессах ультраметаморфизма и флогопитообразования (на примере Алданской флогопитоносной провинции) // Геохимия редкоземельных элементов в эндогенных процессах. Новосибирск, 1982. С. 111–129.
- Петрова З.И., Конева А.А., Макрыгина В.А.* Геохимия кварцитов и кварцитосланцев Приольхонья и о-ва Ольхон (Западное Прибайкалье) // Геохимия, 1995. № 10. С. 1448–1464.
- Петрова З.И., Макрыгина В.А., Резницкий Л.З.* Реконструкция источников и условий формирования протолита метатерригенных гнейсов по геохимическим данным (Слюдянская серия юго-западного Прибайкалья) // Проблемы литологии, геохимии и рудогенеза осадочного процесса. Т. 2. М., 2000. С. 113–117.
- Петрография Таджикистана.* Т. 1. Душанбе: Дониш, 1986. 283 с.
- Плутман И.И.* Распределение урана, тория и калия в отложениях Западно-Сибирской плиты // Геохимия, 1975. № 5. С. 756–767.
- Поделько Е.Я.* Бор в верхнемезозойских отложениях Боргойской и Ононской впадин Забайкалья // Микроэлементы в каустобиолитах и осадочных породах. М., 1965. С. 11–33.
- Поделько Е.Я.* Бор в карбонатных отложениях как показатель фациальных условий осадкообразования // Геохимия карбонатных отложений системы Камско-Кинельских прогибов. М., 1975. С. 39–49.
- Поделько Е.Я., Лыгалова В.Н.* Бор – показатель палеофациальных условий образования терригенных пород в зонах залегания боросодержащих рассолов // Малые и рассеянные элементы в осадочных породах и нефтях. М., 1970. С. 22–47.
- Подковыров В.Н.* Осадочные последовательности рифея и венда стратотипических регионов Сибири и Урала (литохимия, хемотратиграфия, геодинамические обстановки формирования): Дис. ... докт. геол.-минерал. наук. СПб., 2001. 394 с.
- Покровский П.В.* Бериллий в гранитоидах Урала // Ежегодник-1975 ИГГ УНЦ АН СССР. Свердловск, 1976. С. 73–76.
- Поляков А.И., Кот Г.А.* Распределение тория по минералам в нефелиновых сиенитах Ловозерского массива // Геохимия, 1965. № 1. С. 73–85.
- Поляков Д.М.* Накопление химических элементов донными осадками Японского моря (на примере разреза Владивосток – Ниигата) // Геохимия, 2003. № 4. С. 455–461.
- Поляков Д.М., Боцул А.И.* Геохимия некоторых металлов в осадках маргинального фильтра р. Раздольная (Амурский залив – Японское море) // Геохимия, 2004. № 4. С. 455–461.
- Пополитов Э.И., Вольнец О.Н.* Геохимические особенности четвертичного вулканизма Курило-Камчатской островной дуги и некоторые вопросы петрогенезиса. Новосибирск: Наука, 1981. 182 с.
- Пугачева И.П., Филатов Е.И., Колдаева Т.Г.* Девонская вулканоплутоническая ассоциация Рудного Алтая (на примере Змеиногорского рудного района) // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1981. № 11. С. 45–54.
- Пузанков Ю.М., Селиверстов В.А., Пархоменко В.С., Шестель С.Т.* Систематизация эвгеосинклинальных базальтоидов Камчатки по данным о распределении редкоземельных и радиоактивных элементов // Геохимия редких, редкоземельных и радиоактивных элементов в породо- и рудообразующих процессах. Новосибирск, 1989. С. 15–36.
- Пухтель И.С., Журавлев Д.З.* Петрология основных-ультраосновных метавулканитов и связанных с ними пород Олондинского зеленокаменного пояса, Алданский щит // Петрология, 1993. Т. 1, № 3. С. 306–344.
- Пчелинцева Н.И.* Поведение золота при формировании гранитоидных интрузивов Северного Казахстана // Геохимия золота. Владивосток, 1978. С. 76–84.
- Пятенко И.К.* О бериллиевой минерализации в щелочных дифференциатах базальтового ряда // Редкие элементы. Сырье и экономика, 1971. Вып. 2. С. 105–112.
- Рабинович А.В., Бадалов С.Г.* К геохимии меди некоторых интрузивных пород Карамая // Геохимия, 1971. № 2. С. 243–248.

*Рабинович А.В., Баскова З.А.* Характер распределения свинца в некоторых гранитоидах Восточного Забайкалья // *Геохимия*, 1959. № 6. С. 546–549.

*Равич М.Г., Каменев Е.Н.* Кристаллический фундамент Антарктической платформы. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 656 с.

*Равич М.Г., Климов Л.В., Соловьев Д.С.* Докембрий Восточной Антарктиды. М.: Недра, 1965. 470 с.

*Равич М.Г., Соловьев Д.С.* Геология и петрология центральной части гор Земли Королевы Мод (Восточная Антарктида). Л.: Недра, 1966. 290 с.

*Развозжаева Э.А., Макрыгина В.А., Мартихаева Д.Х.* Геохимия рудных элементов в углеродистом веществе матаосадочных пород Байкало-Патомского нагорья // *Геохимия*, 1997. № 8. С. 835–843.

*Разин Л.В., Хвостова В.П., Новиков В.А.* Металлы группы платины в породообразующих и акцессорных минералах ультраосновных пород // *Геохимия*, 1965. № 2. С. 159–174.

Редкие элементы и акцессорные минералы в интрузивных комплексах Среднего Тянь-Шаня / В.В. Козырев, Ю.В. Ежов, И.В. Левченко и др. Ташкент: Изд-во ФАН Узб. ССР, 1972. 299 с.

*Резанов И.А.* Ранняя история Земли // *Вест. РАН*, 2002. Т. 72, № 7. С. 604–610.

*Резанов И.А.* Эволюция представлений о земной коре. М.: Наука, 2002. 299 с.

*Резник В.П., Федорчук Н.А.* Тонкое золото в морских и океанических осадках // *Литология и полез. ископаемые*, 2000. № 4. С. 355–363.

*Резников И.Н., Ишевская И.Г.* Геохимические критерии расшифровки генезиса гранитоидов докембрия и их практическое значение на примере кировоградских гранитоидов УКЩ // *Научные основы геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых и оценки потенциальной рудоносности магматических и метаморфических комплексов докембрия. Апатиты*, 1972. С. 51–54.

*Резницкий Л.З., Школьник С.И., Левицкий В.И.* Геохимия известково-силикатных пород Харагольской свиты (Южное Прибайкалье) // *Литология и полез. ископаемые*, 2004. № 3. С. 273–285.

*Риваленти Дж.* Геохимия метавулканических амфиболитов юго-западной Гренландии // *Ранняя история Земли*. М., 1980. С. 223–233.

*Рипп Г.С.* Распределение олова в минералах, рудах и породах Саяно-Байкальской горной области. Улан-Удэ, 1976. 127 с.

*Розен Б.Я.* Геохимия брома и йода. М.: Недра, 144 с.

*Розенбуш Г.* Описательная петрография. Л.; М.; Грозный; Новосибирск: Горгеонефтеиздат, 1934. 720 с.

*Рой С.* Месторождения марганца. М.: Мир, 1986. 520 с.

*Ронов А.Б., Ермишкина И.К.* Распределение марганца в осадочных породах // *Геохимия*, 1959. № 3. С. 206–225.

*Ронов А.Б., Хлебникова З.В.* Химический состав важнейших генетических типов глин // *Геохимия*, 1957. С. 449–469.

*Ронов А.Б., Михайловская М.С., Солодкова И.И.* Эволюция химического и минерального состава песчаных пород // *Химия земной коры*. Т. 1. М., 1963. С. 201–252.

*Ронов А.Б., Ярошевский А.А.* Химическое строение земной коры // *Геохимия*, 1967. № 11. С. 1285–1309.

*Ронов А.Б., Балашов Ю.А., Мигдисов А.А.* Геохимия редкоземельных элементов в осадочном цикле // *Геохимия*, 1967. № 1. С. 3–19.

*Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А.* Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 182 с.

*Росляков Н.А.* Геохимия золота в зоне гипергенеза. Новосибирск: Наука, 1981. 238 с.

*Руб М.Г.* Особенности вещественного состава и генезиса рудоносных вулcano-плутонических комплексов. М.: Наука, 1970. 363 с.

*Рыбаков С.И., Голубев А.М., Лавров М.М. и др.* Новые данные по платиноносности Карелии // *Платина России*. Т. 2. Кн. 2. М., 1995. С. 3–9.

*Сабельников С.Е.* Геохимия рудных и редких элементов гранит-лейкогранитовой формации Кокшаальской складчатой зоны Южного Тянь-Шаня // Геохимия магматических и метаморфических образований Тянь-Шаня. Фрунзе, 1989. С. 32–51.

*Сазонов В.Н.* Некоторые элементы-примеси в процессе средне-низкотемпературного кислотного выщелачивания // Геохимия и минералогия первичных и вторичных ореолов. Свердловск, 1986. С. 33–46.

*Сазонов В.Н.* Минеральный баланс золота в метасоматитах березит-лиственитовой формации и их исходных породах // Минеральный баланс химических элементов в горных породах и рудах Урала. Вып. 1. Свердловск, 1989. С. 11–22.

*Сазонов В.Н.* Закономерности распределения железа в метасоматитах березит-лиственитовой формации и их исходных породах (на основе минеральных балансов) // Там же. С. 37–46.

*Сазонов В.Н.* Минеральный баланс золота в продуктах пропилитизации горных пород основного и среднекислого состава // Минеральный баланс химических элементов в горных породах и рудах Урала. Вып. 2. Свердловск, 1991. С. 20–26.

*Салихов Д.Н.* Платина палладий и иридий в габбро-базальтовых породах Магнитогорского мегасинклинория // Микроэлементы в магматических и метаморфических породах Урала. Уфа, 1987. С. 4–9.

*Салихов Д.Н., Яркова А.В., Салихова Р.Н.* Базальт-трахибазальтовый вулканизм позднего девона Магнитогорского мегасинклинория // Там же. С. 31–39.

*Салье М.Е., Дук В.Л., Бугрова В.Д.* Некоторые вопросы геологии, внутреннего строения и петрологии флогопитовых месторождений Алдана // Ультраметаморфизм и метасоматоз докембрийских формаций СССР. М.; Л.: Наука, 1966. С. 25–62.

*Самаркин Г.И., Самаркина Е.Я.* Литий и цезий в гранитоидах главного гранитного пояса Южного Урала // Редкие элементы в гранитоидах Урала. Свердловск, 1981. С. 69–88.

*Самаркина Е.Я., Самаркин Г.И.* Рубидий в гранитоидах Главного гранитного пояса Южного Урала // Там же. С. 54–68.

*Санделл Э.Б., Гольдич С.С.* Редкие металлы некоторых американских изверженных пород // Редкие элементы в изверженных горных породах и минералах. М., 1952. С. 183–227.

*Сараев С.В.* Петрохимия, геохимия и реконструкция обстановок осадконакопления Ауминза-Беспанского комплекса Южного Тамдытау (Центральные Кызылкумы) // Сравнительный анализ морского осадконакопления в докембрии и палеозое. Новосибирск, 1980. С. 73–100.

*Саркисян С.Г.* Петрографо-минералогические исследования верхнепермских и триасовых пестроцветных отложений Приуралья. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. 192 с.

*Сауков А.А.* Геохимические очерки. М.: Наука, 1976. 556 с.

*Сауков А.А., Айдиньян Н.Х.* Очерки геохимии ртути. М.: Наука, 1972. 336 с.

*Сауков А.А., Озерова Н.А.* Ртуть // Металлы в осадочных толщах. Тяжелые цветные металлы. Малые и редкие металлы. М., 1965. С. 208–231.

*Сафронов В.Т.* Исходный минеральный состав и геохимические особенности глиноземистых гнейсов Чупинской свиты Беломорской серии Балтийского щита // Литология и полез. ископаемые, 2005. № 5. С. 541–552.

*Сафронов В.Т., Розен О.М.* Метакарбонатные породы (кальцифиры) Лапландско-Колвицкого гранулитового пояса Балтийского щита // Литология и полез. ископаемые, 2004. № 5. С. 491–503.

*Сахама Т.Г.* Рассеянные элементы в породах Южной Финской Лапландии // Редкие элементы в изверженных горных породах и минералах. М., 1952. С. 228–244.

*Севастьянов Г.И.* Предварительные данные о распределении золота в конгломератах Тельпосской свиты на Приполярном Урале // Геология и полезные ископаемые Приполярного и Полярного Урала. Тюмень, 1972. С. 159–163.

*Сергеева Н.Д.* Акцессорные минералы терригенных толщ // Нижний рифей Южного Урала / В.И. Козлов, А.А. Краснобаев, Н.Н. Ларионов и др. М., 1989. С. 148–166.

Серебро (геология, минералогия, генезис, закономерности размещения месторождений) / А.А. Сидоров, М.М. Константинов, Р.А. Еремин и др. М.: Наука, 1989. 240 с.

- Серых В.И.* К геохимии никеля в гранитоидах // Геохимия, 1964. № 9. С. 898–907.
- Серых В.И., Иванов О.М., Козырева Е.К.* Поведение бериллия в процессе кристаллизации и метасоматического преобразования гранитов и вопросы геохимической специализации позднегерцинских интрузий // Геология Центрального Казахстана. Алма-Ата, 1969. С. 96–112.
- Сидельникова В.Д., Швей И.В.* Селен в палеозойских отложениях Средней Азии // Очерки по геологии и геохимии рудных месторождений. М., 1970. С. 307–310.
- Сизых Н.В., Коткин В.В.* Литолого-геохимические особенности черносланцевых отложений Патомского нагорья // Проблемы литологии, геохимии и рудогенеза осадочного процесса. Т. 2. М., 2000. С. 224–228.
- Силантьев С.А., Соколов С.Д., Бондаренко Г.В. и др.* Геохимия и петрология высокобарических амфиболитов в аккреционной структуре полуострова Тайгонос (северо-восток России) // Геохимия, 1996. № 12. С. 1139–1147.
- Синдеева Н.Д., Курбанова Н.З.* О кларке селена в некоторых горных породах СССР // Докл. АН СССР, 1958. Т. 120, № 2. С. 353–355.
- Ситникова З.И.* Состав и условия образования бокситов Мугайского месторождения // Геология палеозоя и мезозоя Урала и Зауралья (Тр. Ин-та геол. и геохим. УФАИ СССР. Вып. 22). Свердловск, 1975. С. 161–185.
- Слабунов А.И., Богина М.М., Злобин В.Л., Матуков Д.И.* Вокшозерская структура Керетского зеленокаменного пояса Беломорского подвижного пояса. Петрология, геохронология метавулканитов и геодинамические следствия // Геология и полезные ископаемые Карелии, 2007. Вып. 10. С. 5–15.
- Ситько А.Т., Ахметова Г.Д., Беркалиев Н.А. и др.* Новый железорудный бассейн в Бетпак-Дале (месторождение Гвардейское) // Сов. геология, 1971. № 8. С. 88–99.
- Слукин А.Д., Живцов Д.А.* Гиббсит-галлуазит-аллофановая минерализация в бассейне р. Мая // Проблемы генезиса бокситов. М., 1975. С. 193–201.
- Смирнов Г.А., Пумпянский А.М.* Литолого-геохимические особенности живетской и нижнефранкской кремнистых толщ // Материалы по литологии и геохимии осадочных образований Урала. Свердловск, 1971. С. 38–45.
- Смит Х.С., О'Нил Дж.Р., Эрланк А.Дж.* Изотопный состав кислорода минералов и горных пород и характер химического изменения подушечных лав зеленокаменного пояса Барбертон, Южная Африка // Геохимия архея: происхождение и эволюция архейской континентальной коры. М., 1987. С. 147–172.
- Смыслов А.А.* Уран и торий в земной коре. Л.: Недра, 1974. 232 с.
- Сначев В.И., Рачев П.И.* Некоторые геохимические особенности карбонатных пород Кочкарской площади (Южный Урал) // Микроэлементы в магматических, метаморфических и рудных формациях Урала. Уфа, 1991. С. 110–115.
- Соболев С.Ф.* Габбро-тоналитовый комплекс Полярного Урала. М.: Наука, 1965. 163 с.
- Соболев С.Ф.* Акцессорные минералы ультраосновных и основных пород Урала // Акцессорные минералы изверженных пород. М., 1968. С. 236–248.
- Созинов Н.А., Чистякова Н.Н., Казанцев В.А.* Металлоносные черные сланцы Курской магнитной аномалии. М.: Наука, 1988. 149 с.
- Солодов Н.А., Балашиов Л.С., Кременецкий А.А.* Геохимия лития, рубидия и цезия. М.: Недра, 1980. 234 с.
- Солодов Н.А., Бурков В.В., Овчинников Л.Н.* Геологический справочник по легким литофильным металлам. М.: Недра, 1986. 287 с.
- Солодов Н.А., Семенов Е.И., Бурков В.В.* Геологический справочник по тяжелым литофильным редким элементам. М.: Недра, 1987. 439 с.
- Сочава А.В.* Красноцветные формации докембрия и фанерозоя. Л.: Наука, 1979. 207 с.
- Сперанская И.М.* Петрохимические типы меловых лав в различных тектонических районах Охотского побережья // Петрохимические особенности молодого вулканизма. М., 1963. С. 115–136.
- Спиридонов Э.М.* Золото и медь в горных породах Степнякского и Бестюбинского золоторудных полей // Геология и геофизика, 1971. № 9. С. 124–130.

- Справочное руководство по петрографии осадочных пород. Т. 2. Л.: Гостоптехиздат, 1958. 519 с.
- Ставров О.Д. Геохимия лития, рубидия, цезия в магматическом процессе. М.: Недра, 1978. 214 с.
- Старикова Е.В., Брусницын А.И., Жуков И.Г. Палеогидротермальная постройка марганцевого месторождения Кызыл-Таш, Южный Урал. СПб.: Наука, 2004. 230 с.
- Старков Н.П. К вопросу о метаморфизме древних свит Западного склона Северного Урала // Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала. Свердловск, 1963. С. 223–233.
- Степанов А.А. Терригенные породы Северной части Патомского нагорья и их металлогения // Золотоносные конгломераты южной окраины Сибирской платформы. М., 1966. С. 45–68.
- Страхов Н.М., Родионова К.Ф., Залманзон Э.С. К геохимии нефтеносных отложений (нижнефранские породы Второго Баку) // К геохимии и литологии палеозойских осадочных пород. М., 1955. С. 3–115.
- Страхов Н.М., Залманзон Э.С., Глаголева М.А. Очерки геохимии верхнепалеозойских отложений гумидного типа. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 223 с.
- Страхов Н.М., Штеренберг Л.Е., Калинин В.В., Тихоитрова Е.С. Геохимия осадочного марганцевородного процесса. М.: Наука, 1968. 495 с.
- Стрыгин А.И. Метаморфизм железистых пород Украинского щита // Проблемы железистых пород докембрия. Киев, 1969. С. 155–168.
- Сутурин А.Н. Геохимия гипербазитов Восточного Саяна. Новосибирск: Наука, 1978. 141 с.
- Сильман А.М., Берсенева Н.П. Рубидий и стронций в карбонатных породах бакальской свиты рифея на Южном Урале. Ежегодник-1981 ИГГ УНЦ АН СССР, 1982. С. 81–82.
- Сутурин А.Н., Глазунова А.Д., Арсеньев М.И. Геохимия никеля, кобальта и ванадия в гипербазитах Восточного Саяна // Геохимия, 1974. № 1. С. 105–111.
- Сухарина А.Н. Бокситоносность нижнего кембрия в горных сооружениях Западной Сибири // Сов. геология, 1976. № 5. С. 83–94.
- Танатар-Бараи З.И., Дудник Н.Ф. Геохимия элементов семейства железа в метабази-тах Среднего Приднепровья // Геохимия, 1977. № 1. С. 104–111.
- Тарни Дж. Геохимия архейских высокометаморфизованных гнейсов. Вывод о происхождении и эволюции докембрийской земной коры // Ранняя история Земли. М., 1980. С. 407–420.
- Тарханов А.В. К вопросу о происхождении железистых кварцитов // Проблемы образования железистых пород докембрия. Киев, 1969. 34–40.
- Татаринцев А.В., Шмакин Б.М. Средний состав, особенности распределения элементов-примесей и геохимическая специализация мраморовых пегматитов (Восточная Сибирь) // Геохимия, 1976. № 2. С. 272–282.
- Таусон Л.В. Геохимия лития, рубидия и таллия в магматическом процессе // Междунар. геол. конгр. XXI сессия. Докл. сов. геологов. Геохимические циклы. М., 1960. С. 93–100.
- Таусон Л.В. Геохимия редких элементов в гранитоидах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 232 с.
- Таусон Л.В., Захаров М.Н. Геохимические особенности калиевых щелочных базальтоидов Приаргуны // Геохимия, 1971. № 3. С. 380–391.
- Таусон Л.В., Кузьмин М.И., Легейдо В.А. Сравнительное поведение олова в оловоносных и неоловоносных гранитах Восточного Забайкалья // Геохимия, 1966. № 2. С. 161–167.
- Таусон Л.В., Ломоносов И.С., Глюк Д.С. и др. О возможности образования гидрогенных месторождений золота // Докл. АН СССР, 1969. Т. 305, № 4. С. 960–964.
- Таусон Л.В., Кузьмин М.И., Антипин В.С., Петров Л.Л. Бериллий в мезозойских гранитоидах Восточного Забайкалья // Геохимия, 1969, № 8. С. 952–963.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора, ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 380 с.
- Терентьева К.Ф., Ильина Н.С. О минералах моногидрата глинозема в силурийских и девонских известняках в районе месторождения Красная Шапочка // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1942. № 4. С. 23–24.

Тимошина Р.Г. Петрология метаморфических пород Приполярного Урала. Л.: Наука, 1980. 102 с.

Тимофеев В.Д. Киноварь, золото, халькопирит и циркон в известняках Русской платформы // Докл. АН СССР, 1960. Т. 131, № 2. С. 395–397.

Тихоненкова Р.П. Средние содержания акцессорных минералов щелочных пород как индикатор их формационной принадлежности // Акцессорные минералы магматических и метаморфических пород. М., 1982. С. 83–96.

Толок А.А. Геохимические особенности Погинского массива нефелиновых сиенитов в Приморье // Геохимия, 1964. № 12. С. 1256–1260.

Толок А.А., Нартов Г.А., Татарин И.А. О поведении редких элементов при дифференциации гипабиссальных щелочных габброидов натриевого ряда (олово) // Геохимия, 1971. № 1. С. 39–47.

Трошин Ю.П., Гребенщикова В.И., Кочеткова Л.Ф. Геохимические аспекты связи магматизма и золотого оруденения // Проблемы рудоносности магматических пород. Иркутск, 1987. С. 51–86.

Троценко И.Н. Геохимические признаки унаследованности состава мигматитов (на примере обрамления Криворожской зоны) // Геохимия, 1975. № 10. С. 1552–1567.

Туркин В.А., Выродова М.Н. Условия образования давсонита в угленосных отложениях балахонской серии Кузбасса // Сов. геология, 1977. № 6. С. 75–88.

Туровский С.Д., Кокарев Г.Н. Акцессорные минералы палеозойских интрузивных комплексов Северного Тянь-Шаня // Акцессорные минералы изверженных пород. М., 1968. С. 130–141.

Уран и торий в магматическом и метаморфическом петрогенезисе / В.П. Ковалев, С.В. Мельгунов, А.Д. Ножкин. Новосибирск: Наука, 1983. 181 с.

Урусов В.С., Таусон В.Л., Акимов В.В. Геохимия твердого тела. М.: ГЕОС, 1997. 550 с.

Усенко И.С., Кравченко Г.П., Сахацкий И.И. Особенности распределения золота в железокремнистых и некоторых других кристаллических породах Приазовья // Геол. ж., 1973. Т. 33, № 5. С. 60–68.

Ушатинский И.Н., Боровский В.В. Бокситы Щучьинского синклиория (Полярный Урал) // Сов. геология, 1977. № 6. С. 57–74.

Ушатинский И.Н., Боровский В.В. Бокситы Карско-Усинского синклиория (Полярный Урал) // Сов. геология, 1978, № 12. С. 42–52.

Федоров П.И., Филатова Н.И. Геохимия и петрология позднемеловых – кайнозойских базальтов на континентальной окраине северо-востока Азии // Геохимия, 1999. № 2. С. 115–132.

Федоров Ю.Н., Ерохин Ю.В., Иванов К.С. и др. О геохимической неоднородности вогулкинской толщи в пределах Шаимского района Западно-Сибирского мегабассейна // Ежегодник-2004 ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2005. С. 220–225.

Федорчук В.П., Минцер Э.Ф. Геологический справочник по ртути, сурьме, висмуту. М.: Недра, 1990. 212 с.

Федчин Ф.Г., Симаненко В.П., Архипов Н.И. и др. Геология и состав Самаргинского вулканоплутонического комплекса // Изверженные породы востока Азии. Владивосток, 1976. С. 37–45.

Ферсман А.Е. Геохимия. Т.1. Л.: Госхимтехиздат, 1933. 328 с.

Ферштатер Г.Б., Бородин Н.С. Петрология магматических гранитоидов. М.: Наука, 1975. 288 с.

Фишман М.В., Голдин Б.А., Калинин Е.П. Некоторые особенности амфиболитов Приполярного Урала // Петрография и минералогия Приполярного Урала и Тимана. М.; Л., 1966. С. 98–113.

Фишман М.В., Голдин Б.А., Юшкин Н.П., Калинин Е.П. Акцессорные минералы в горных породах южной части Печорского Урала // Там же. С. 3–63.

Фишман М.В., Юшкин Н.П., Голдин Б.А., Калинин Е.П. Минералогия, типоморфизм и генезис акцессорных минералов изверженных пород севера Урала и Тимана. Л.: Наука, 1968. 251 с.

Фоминых В.Г. Минеральный баланс железа, титана и ванадия в некоторых базальтоидных породах Урала // Минеральный баланс химических элементов в горных породах и рудах Урала. Вып. 2. Свердловск, 1991. С. 30–53.

Фурсов В.З. Ртуть – индикатор при геохимических поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1977. 143 с.

Хардер Г. Геохимия бора. М.: Недра, 1965. 136 с.

Хворостов В.П., Зайцев В.П. Рудоносные магматические комплексы Ичигин-Уннэйва-янского района // Тихоокеанская геология, 1983. № 2. С. 42–48.

Хвостова В.П., Головня С.В., Чернышова Н.В. Металлы платиновой группы в основных кристаллических сланцах гранулитового комплекса Сальных Тундр (Кольский полуостров) // Геохимия, 1975. № 5. С. 748–787.

Холоднов В.В., Бушляков И.Н. Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 394 с.

Холодов В.Н. Распределение элементов-примесей в курумсакско-чулуктауских отложениях Каратау (Казахстан) // Геохимия, 1973. № 7. С. 1046–1055.

Хрусталева В.К. Геохимия и рудоносность палеозойских гранитоидов Витимского плоскогорья. Новосибирск: Наука, 1990. 134с.

Чащин А.А., Мартынов Ю.А., Рассказов С.В. и др. Изотопно-геохимическая характеристика позднемиоценовых субщелочных и щелочных базальтов юга Дальнего Востока России как показатель роли континентальной литосферы в их происхождении // Петрология, 2007. Т. 15, № 6. С. 620–644.

Чащухина В.А. Минеральный баланс циркония в некоторых гранитоидах различной формационной принадлежности // Минеральный баланс химических элементов в горных породах и рудах Урала. Вып. 2. Свердловск, 1991. С. 54–58.

Чащухина В.А., Вигорова В.Г., Траянова М.В. Роль акцессорных минералов в балансе ниобия // Минеральный баланс химических элементов в горных породах и рудах Урала. Свердловск, 1989. С. 80–85.

Чельшев В.И., Мельникова Е.М., Беляев В.В. Минералогические особенности бызовской свиты Северного Приуралья // Геология северо-востока Русской платформы и Приполярного Урала. Сыктывкар, 1965. С. 41–52.

Чен-Лен-Сон Б.И. Проявления россыпного золота в Актыбинском и Оренбургском Приуралье // Урал. геол. ж., 1999. № 5. С. 161–166.

Черкасов Г.Н., Шаламов И.В., Шевцов А.П., Чеха В.П. Новые данные по бокситоносности юго-западного Прианбарья // Проблемы геологии алюминиевого сырья Сибири. Вып. 256. Новосибирск, 1977. С. 20–26.

Чернышов Н.М. Сульфидные медно-никелевые месторождения юго-востока Воронежского кристаллического массива. Воронеж: Изд-во ун-та, 1971. 312 с.

Чернышов Н.М., Плаксенко А.Н. Акцессорные минералы дифференцированных габбро-норит-гипербазитовых интрузий Воронежского кристаллического массива // Акцессорные минералы магматических и метаморфических пород. М., 1982. С. 96–111.

Шарова А.К., Гладковский А.К. К вопросу о корреляции известняков и ее значении при поисках и разведке девонских бокситов на Урале // Материалы по геологии и полезным ископаемым Урала. Вып. 6. М., 1958. С. 103–110.

Шатков Г.А. Фтор и хлор в базальтах как возможные индикаторы металлогенической зональности // Сов. геология, 1975. № 6. С. 121–127.

Шапкина В.П. Петрохимическая характеристика метаморфических пород Сахалина // Метаморфические комплексы Востока СССР. Владивосток, 1973. С. 142–160.

Шванов В.Н. Литоформационные корреляции терригенных и метаморфических толщ. Южный Тянь-Шань. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 216 с.

Шор Г.М., Спиридонов А.А., Касперкевич Е.П. и др. Некоторые особенности геохимии ассоциаций химических элементов в мезозойско-кайнозойских отложениях южной окраины Западно-Сибирской плиты // Геохимия платформенных и геосинклинальных осадочных пород и руд. М., 1983. С. 62–75.

*Шталь В.Н.* Петрохимические особенности верхнемеловых вулканогенных формаций Восточного Забайкалья // Петрохимические особенности молодого вулканизма. М., 1963. С. 172–183.

*Шумилова Е.В.* Минералого-петрографическая характеристика четвертичных доказанцевских отложений севера Западной Сибири. М.: Наука, 1971. 157 с.

*Шутов В.Д.* Минеральные парагенезисы граувакковых комплексов. М.: Наука, 1975. 110 с.

*Шербаков И.Б.* Петрография докембрийских пород центральной части Украинского Щита. Киев: Наук. думка, 1975. 279 с.

*Шербаков Ю.Г.* Распределение и условия концентрации золота в рудных провинциях. М.: Наука, 1967. 268с.

*Юдович Я.Э., Степанов Ю.В., Юдина М.А.* Геохимия угольных включений в верхнепермских отложениях Средней Печоры // Геохимия осадочных формаций и подземных вод Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Сыктывкар, 1972. С. 56–72.

*Юдович Я.Э., Чермных В.А., Пучков В.Н.* Геохимические особенности нижнекаменноугольных отложений Усть-Войского месторождения точильного камня // Геохимия осадочных формаций и подземных вод Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Сыктывкар, 1972. С. 3–23.

*Юшкин Н.П.* Минералогия соляной толщи Сереговского купола (Коми АССР) // Минералогия Тиманско-Североуральского региона. Сыктывкар, 1989. С. 37–51.

*Язева Р.Г.* Петрология кайнотипных франкских перлитов из бассейна Северной Сосьвы (Северный Урал) в свете соотношения натриевых и калиевых пород // Геосинклинальные магматические формации и их рудоносность. Свердловск, 1973. С. 106–113.

*Язева Р.Г., Бочкарев В.В.* Силурийская островная дуга Урала: структура, развитие, геодинамика // Геотектоника, 1995. № 6. С. 32–44.

*Язева Р.Г., Бочкарев В.В.* Золото в магматических породах Урала // Изв. АН СССР, 1990. № 1. С. 91–100.

*Язева Р.Г., Бочкарев В.В.* Геология и геодинамика Южного Урала. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1998. 204 с.

*Ярославский Р.И., Скорнякова И.В.* Вольфрам в породах и минералах гранулитовой фации Северо-Нуратинского хребта (Южный Тянь-Шань) // Геохимия, 1974. № 9. С. 1404–1405.

*Ярошевич В.М.* Золото, сера и  $C_{орг.}$  в породах рифея северо-западной части Восточного Саяна // Геохимия, 1983. № 2. С. 306–310.

*Ярошевский А.А.* Распространенность химических элементов в земной коре // Геохимия, 2006. № 1. С. 54–62.

Bauxite reserves and potential aluminum resources of World // Geol. Surv. Bul., 1228. Washington, 1967. 176 p.

*Berg G.* Vorkommen und Geochemie der mineralischen Rohstoffe. Leipzig: Akad. Verlags., 1929. 414 S.

*Berger E.T.* Heterogeneites petrographiques du manteau Sudpacifique, Sous l'archipel des Australs: mise en evidence et interpretation par l'etude ultramafiques // Bull. Soc. Geol. France, 1985. V. 1. No. 2. P. 207–216.

*Blank H.R.* Hornblende schists in Manhattan formation, in the Bronx, New York // Geol. Soc. Amer. Bull., 1972. V. 83, No. 5. P. 1397–1411.

*Boyle R.W.* The geochemistry of silver and its deposits // Geol. Surv. Can. Bull., 1968. No. 160. 264 p.

*Brooks R.R., Ahrens L.N., Taylor S.R.* The determination of trace elements in silicate rocks by a combined spectrochemical-anion exchange technique // Geoch. et Cosmoch. Acta, 1960. V. 18, No. 3/4. P. 162–178.

*Buddington A.F.* Isograds and the role of  $H_2O$  in metamorphic facies of orthogneisses of the north-west Adirondack Area, New York // Geol. Soc. Amer. Bull., 1963. V. 74, No. 9. P. 1155–1182.

*Budzinski H.* Die Bilanzierung von REE-gesteinsdaten mafischer granulite // Zs. Geologische Wissenschaften, 1990. Bd. 18. No. 3. S. 211–225.

*Buttler J.R.* Geologic evolution of the beartooth mountains, Montana and Wyoming. Pt. 6. Cathedral Peak Area, Montana // Geol. Soc. Amer. Bull., 1966. V. 77, No. 1. P. 45–64.



- Clarke F. The data of geochemistry // U.S. Geol. Surv. Bull., 1924. V. 770. P. 841.
- Condie K.C., Wilks M., Rosen D.M., Zlobin V.L. Geochemistry of metasediments from the Precambrian Harschan Series, eastern Anabar Shield, Siberia // Precambrian Research, 1991. V. 50. P. 37–47.
- Condie K.C., Lee D., Farmer G.L. Tectonic setting and provenance of the Neoproterozoic Uinta Mountain and Big Cottonwood groups, northern Utah: constraints from geochemistry, Nd isotopes, and detrital modes // Sedimentary geology, 2001. V. 141–142. P. 443–464.
- Condie K.C., Barsky C.K. Origin of quartzary basalts from the black rock Desert Region, Utah // Geol. Soc. Amer. Bull., 1972. V. 83, No. 2. P. 333–352.
- Cooper D.C., Field D. The chemistry and origins of proterozoic low-potash, high-iron charnockitic gneisses from Tromøy, South Norway // Earth. Plan. Sci., 1981. V. 35, No. 1. P. 171–180.
- Davis G.A., Holdway M.J., Lipman P.W., Romey W.D. Structure, metamorphism and plutonism in the South-Central Klamath Mountains, California // Geol. Soc. Amer. Bull., 1965. V. 76. No. 8. P. 933–966.
- Di Leo P., Dinelli E., Mondelli G., Schiattarella M. Geology and geochemistry of Jurassic pelagic sediments, Scisti silicei Formation, southern Apennines, Italy // Sedimentary geology, 2002. V. 150. P. 229–246.
- El Wardani S.A. On the geochemistry of germanium // Geoch. et Cosmoch. Acta, 1957. V. 13, No. 1. P. 5–19.
- Erikson E.H. Petrology of the composite Snoqualmie batholith, Central Cascade Mountains, Washington // Geol. Soc. Amer. Bull., 1969. V. 80, No. 11. P. 2213–2236.
- Ernst W.G. Mineral parageneses in Franciscan metamorphic rocks, Panoche Pass, California // Geol. Soc. Amer. Bull., 1965. V. 76, No. 8. P. 879–914.
- Fairbairn H.W., Ahrens L.N., Gorfinkle L.G. Minor element content of Ontario diabase // Geoch. et Cosmoch. Acta, 1953. V. 3, No. 1. P. 34–46.
- Fisher G.W. Kyanite-, staurolite- and garnet-bearing schists in the Setters Formation, Maryland Piedmont // Bull. Geol. Soc. Amer., 1971. V. 82, No. 1. P. 229–232.
- Font E., Nedelec A., Trindade R.I.F. et al. Chemostratigraphy of the neoproterozoic Mirassol d'Oeste cap dolostones (Mato Grosso, Brazil): An alternative model for Marinoan cap dolostone formation // Earth and Planetary Science Letters, 2006. V. 250. P. 89–103.
- Francalanci L. Trace element partition coefficients for minerals in shoshonitic and calc-alkaline rocks from Stromboli Island (Aeolian Arc) // Neues Jahrb. für Mineralogie. Stuttgart, 1989. Bd. 160, No. 3. S. 229–247.
- Gallet S., Jahn B., Van Vliet Lanoë B. et al. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust // Earth and Planetary Science Letters, 1998. V. 156. P. 157–172.
- Goodwin A. M. Archean volcanic studies in the Timmins-Kirkland Lake-Noranda Region of Ontario and Quebec // Geol. Surv. Bull. of Canada, 1979. No. 278. P. 51.
- Götze J. Geochemistry and provenance of the Altendorf feldspathic sandstone in the Middle Bunter of the Thuringian basin (Germany) // Chemical geology, 1998. No. 150. P. 43–61.
- Grenne T., Roberts D. Geochemistry and volcanic setting of the Ordovician Forbordfjell and Jonsvotn Greenstones, Trondheim region, Central Norwegian Caledonides // Contrib. to Mineral. and Petrol., 1980. V. 74, No. 4. P. 375–376.
- Griffitts W.R., Oda U. Geochemical prospecting for beryllium // Geol. Surv. Profess. Pap., 1960. V. 400B. P. 90–93.
- Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The North American shale composite. Its compilation, major and trace element characteristics // Geoch. et Cosmoch. Acta., 1984. V. 48, No. 12. P. 2469–2482.
- Gromet L.P., Silver L.T. Rare earth element distribution among minerals in a granodiorite and their petrogenetic implications // Geoch. et Cosmoch. Acta., 1983. V. 47, No. 5. P. 925–939.
- Hamaguchi H., Kuroda R. Silver content of igneous rocks // Geoch. et Cosmoch. Acta., 1959. V. 17, No. 1/2. P. 44–52.
- Handbook of Geochemistry 11-3. Springer – Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1972.
- Handbook of Geochemistry 11-4. Springer – Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1974.

- Hirst D.M.* The geochemistry of modern sediments from the Gulf of Paria-2. The location and distribution of trace elements // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1962. V. 26, No. 11. P. 1147–1187.
- Hoffer J.M.* Mineralogy and petrology of Santo Tomas black mountain basalt field potrillo volcanics, South-Central New Mexico // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1971. V. 82, No. 3. P. 603–612.
- Huber H., Koeberl C., McDonald I., Reimold W.U.* Geochemistry and petrology of witwatersrand and dwyka diamictites from South Africa: Search for an extraterrestrial component // *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 2001. V. 65, No. 12. P. 2007–2016.
- Kalliokoski I.* Geology of North-Central Guayana shield, Venezuela // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1965. V. 76, No. 9. P. 1027–1050.
- Kay S.M., Ardolino A.A., Gorrington M.L., Ramos V.A.* The somuncura large igneous province in Patagonia: Interaction of a transient mantle thermal anomaly with a subducting slab // *J. of Petrology*, 2007. V. 48, No. 1. P. 43–77.
- Kobayashi K., Nakamura E.* Geochemical evolution of Akagi volcano, NE Japan: Implications for interaction between island-arc magma and lower crust, and generation of isotopically various magmas // *J. of Petrology*, 2007. V. 42, No. 12. P. 2303–2331.
- Kovisars L.* Geology of a portion of the North-Central Venezuelan Andes // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1971. V. 82, No. 11. P. 3111–3138.
- Krienitz M.S., Haase K.M., Mezger K., Shaikh-Mashail M.A.* Magma genesis and mantle dynamics at the Hrrat ash samah volcanic field // *J. of Petrology*, 2007. V. 48, No. 8. P. 1513–1542.
- Kuroda R.H., Sandell E.B.* Geochemistry molybdenum // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1954. V. 6, No. 1. P. 35–63.
- Larsen E.S., Keevil N.B., Harrison H.C.* Method for determining the age of igneous rocks using the accessory minerals // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1952. V. 63, No. 10. P. 1045–1052.
- Lidden J., Gelinas L., Trudel P.* Archean metavolcanics from the Rouyn – Noranda district Abitibi Greenstone Belt, Quebec. 2. Mobility of trace elements and petrogenetic constraints // *Can. J. of Earth Sci.*, 1982. V. 19, No. 12, P. 2276–2287.
- Lipman P.W.* Gibson peak pluton: a discordant composite intrusion in the Southeastern Trinity Alps, Northern California // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1963. V. 74, No. 10. P. 1259–1280.
- Marshesi C., Garrido C., Bosch D. et al.* Geochemistry of cretaceous magmatism in Eastern Cuba: recycling of North American continental sediments and implications for subduction polarity in Greater Antilles Paleo-arc // *J. of Petrology*, 2007. V. 48, No. 9. P. 1813–1840.
- Maxey L.R.* Petrology and Geochemistry of the beemerville carbonatite – Alkaline Rock Complex, New Jersey // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1976. V. 87, No. 11. P. 1551–1559.
- Moore G.E.* Structure and metamorphism of the Keene-Brattleboro Area, New Hampshire-Vermont // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1949. V. 60, No. 10. P. 1613–1670.
- Muramatsu Y., Wedepohl K.H.* The Distribution of Iodine in the Earth's Crust // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1998. V. 147, No. 3–4. P. 201–216 (*Ред. Журн. «Геология»*, 1999, 2B2).
- Nessbitt H.W., Yung G.M.* Prediction some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic consideration // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1984. V. 48. P. 1523.
- Osae S., Asiedu D.K., Banoeng-Yakubo B. et al.* Provenance and tectonic setting of late proterozoic bentonite sandstones of southeastern Ghana: Evidence from geochemistry and detrital modes // *J. of African Earth Sciences*, 2006. No. 44. P. 85–96.
- Onishi H., Sandell E.B.* Notes on the geochemistry of antimony // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1955. V. 8, No. 4. P. 213–221.
- Piller H.* Über Verwitterung sbildung des Brockengranits nordlich st. Andreasberg // *Beitrage zur Mineralogie und Petrographie*, 1951. No. 2. S. 498–522.
- Pryor W.A.* Petrology of the Permian Yellow Sands of Northeastern England and their North Sea basin equivalents // *Sediment. Geol.*, 1971. V. 6, No. 4. P. 221–254.
- Rankama K.* On the geochemistry of tantalum // *Bull. Com. Geol. Finlande*, 1944. No. 133. P. 25–32.
- Rost F., Grigel W.* Über accessorische Elemente in mitteleuropäischen Eclogiten und ihren Mineralien // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1964. V. 28, No. 12. P. 1933–1951.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the Continental Crust. University of Maryland, College Park, MD, USA. Компьютерная версия, 2004. 64 с.

- Scotford D.M.* Metamorphism and axial-plane folding in the Poundridge area, New York // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1956. V. 67, No. 9. P. 1155–1198.
- Sen N., Nockolds S.R., Allen R.* Trace elements in minerals from rocks of the S. California Batholith // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1959. V. 16, No. 1/3. P. 58–78.
- Shav D.M.* The geochemistry of Thallium // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1952. V. 2, No. 2. P. 118–154.
- Shav D.M.* The geochemistry of Indium // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1952. V. 2, No. 3. P. 185–206.
- Shearer C.K., Papike J.J.* Distribution of boron in the Tip Top pegmatite Black Hills, South Dakota // *Geology*, 1986. V. 14. No. 2. P. 119–123.
- Sighinolfi G.P.* K-Rb ratio in high grade metamorphism; a confirmation of the hypothesis of a continental crustal evolution // *Contr. Miner. and Petrol.*, 1989. V. 21, No. 4. P. 346–356.
- Scotford D.M.* Metamorphism and axial-plane folding in the Poundridge Area, New York // *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1956. V. 67, No. 9. P. 1155–1196.
- Tilton G.P., Patterson C., Brown H. et al.* Isotopic composition and distribution of lead, uranium and thorium in a precambrian granite // *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1955. V. 66. P. 1131–1148.
- Toothill J., Williams C.A., Macdonald R. et al.* A Complex Petrogenesis for an Arc Magmatic Suite, St Kitts, Lesser Antilles // *J. of Petrology*, 2007. V. 48, No. 1. P. 3–42.
- Van de Kamp P.C., Leake B.E.* Petrology, geochemistry, provenance and alteration of Pennsylvanian-Permian Arkose, Colorado and Utah // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1994. V. 106, No. 12. P. 1571–1582.
- Vincent E., Bilefield L.* Cadmium in rocks and minerals from the Scaergaard intrusion, East Greenland // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1966. V. 19. P. 63–59.
- Vogt J.H.L.* Nickel in Igneous Rocks // *Econ. Geol.*, 1923. V. 18. P. 307–353.
- Wedepohl K.H.* *Geochemie*. Berlin: Walter de Gruyter, 1967. 221 s.
- Wedepohl K.H.* The composition of the continental crust // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1995. V. 59, No. 7. P. 1217–1232.
- Whitney P.R.* Variations of the K/Rb ratio in migmatites paragneisses of the Northwest Adirondacks // *Geochim. et Cosmochim. Acta.*, 1984. V. 33. P. 1203–1211.
- Wilkinson J.M., Cann J.R.* Trace elements and tectonic relationships of basaltic rocks in the Ballantrae Complex, Ayrshire // *Geol. Mag.*, 1974. V. 3, No. 1. P. 35–41.
- Wright N.P.* Mineralogic variation in the stone mountain granite, Georgia // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1966. V. 77, No. 2. P. 207–210.
- Wronkiewicz D.J., Kondie K.S.* Geochemistry and mineralogy of sediments from the Ventersdorp and Transvaal Supergroups, South Africa: Gratic evolution during the early proterozoic // *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 1990. V. 54, No. 2. P. 343–354.
- Yang H., Kyser K., Ansdell K.* Geochemistry and Nd isotopic compositions of the metasedimentary rocks in the La Ronge Domain, Trans-Hudson Orogen, Canada: implications for evolution of the domain // *Precambrian Research*, 1998. V. 92. P. 37–64.
- Yung D.A.* Precambrian rocks of the Lake Hopatcong Area, New Jersey // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1971. V. 82, No. 1. P. 143–151.

Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры определено по модели А.Б. Ронова с соавторами (1990). Расчет выполнен по опубликованным результатам анализов важнейших горных пород, в том числе более чем 3400 количественных минералогических анализов, опубликованных преимущественно в СССР.

Среднее содержание **H** в верхней части континентальной коры 0.167%. 71.43% масс **H** находится в осадочных и параметаморфических породах. В максиминералах сконцентрировано 34.18% всей массы **H**, в том числе, %: в рипидолите – 14.94, клинохлоре – 5.08, шамозите – 3.89, каолините – 2.44, пеннине – 2.27, лосоните – 1.78, бейделлите – 1.18, тюрингите – 0.81, серпентине – 0.68, гётите – 0.57, томсоните – 0.54.

Среднее содержание **Li** в верхней части континентальной коры 0.0033%. 61.73% масс **Li** находится в осадочных и параметаморфических породах. Для каждой горной породы определено распределение масс **Li** по участкам с его содержанием, %: низким (< 0.002), средним (0.002–0.005), повышенным (0.005–0.008) и высоким (> 0.008). Распределение масс **Li** в разных горных породах по таким участкам соответственно, %: 0.5–49.8; 33.9–93.2; 3.1–54.4 и 0.6–17.5. Установлено, что в верхней части континентальной коры в литиевых максиминералах сконцентрировано 8.34% всей массы **Li**, в том числе, %: в **Li**-биотите – 6.9, **Li**-мусковите – 1.42, сподумене – 0.01, лепидолите – 0.004, циннвальдите – 0.002, протолитиионите – 0.0002.

Среднее содержание **Na** в верхней части континентальной коры 2.07%. 66.69% масс **Na** находится в метаморфических породах. В верхней части континентальной коры в галите сконцентрировано 3.58% всей массы **Na**.

Среднее содержание **K** в верхней части континентальной коры 2.23%. 62.35% масс **K** находится в метаморфических породах. В максиминералах сконцентрировано 51.92% всей массы **K**, в том числе, %: в калиевых полевых шпатах – 51.9, сильвине – 0.016, карналлите – 0.0008.

Среднее содержание **Rb** в верхней части континентальной коры 0.0098%. Среднее содержание **Rb** в гранитах 0.0205%. 53.54% масс **Rb** находится в осадочных и параметаморфических породах. В каждой горной породе определено распределение масс **Rb** по участкам с его содержанием, %: низким (< 0.005), средним (0.005–0.01), повышенным (0.01–0.03), высоким (0.03–0.05) и очень высоким (> 0.05). Распределение масс **Rb** в разных горных породах по таким участкам соответственно, %: 0.7–76.24; 14.46–79.37; 5.1–47.15; 0–27.23 и 0–11.9. Установлено, что в верхней части континентальной коры в рубидиевых максиминералах сконцентрировано 0.3219% всей массы **Rb**, в том числе, %: в **Rb**-биотите – 0.23, **Rb**-мусковите – 0.091, лепидолите – 0.0008, протолитиионите – 0.0001.

Среднее содержание **Cs** в верхней части континентальной коры  $5.5 \cdot 10^{-4} \%$ . Среднее содержание **Cs** в глинистых и кислых вулканических породах –  $11.3 \cdot 10^{-3}$  и  $1.5 \cdot 10^{-3} \%$ . 57.79% масс **Cs** находится в осадочных и параметаморфических породах. Для каждой горной породы определено распределение масс **Cs** по участкам с его содержанием, %: низким ( $< 5 \cdot 10^{-4}$ ), средним ( $5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$ ), повышенным ( $1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ ), высоким ( $5 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$ ) и очень высоким ( $> 1 \cdot 10^{-2}$ ). Распределение масс **Cs** в разных горных породах по таким участкам соответственно, %: 2.28–75.15; 6.32–56.41; 11.42–85.6; 0–25.46 и 0–26.26%. В верхней части континентальной коры в цезиевых максиминералах сконцентрировано 0.243% всей массы **Cs**, в том числе, %: в **Cs**-биотите – 0.2, берилле – 0.02, **Cs**-стекле – 0.018, лепидолите – 0.004, протолитии – 0.001.

Среднее содержание **Be** в верхней части континентальной коры  $2.3 \cdot 10^{-4} \%$ . 59.63% масс **Be** находится в метаморфических породах. Для каждой горной породы определено распределение масс **Be** по участкам с его содержанием, %: низким ( $< 1 \cdot 10^{-4}$ ), средним ( $1 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4}$ ), повышенным ( $4 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$ ) и высоким ( $> 1 \cdot 10^{-3}$ ). Распределение масс **Be** в разных горных породах по таким участкам соответственно, %: 3.58–55.66; 10.46–59.22; 1.6–46.34; 0–27.95. В верхней части континентальной коры в бериллиевых минералах сконцентрировано 1.29% всей массы **Be**, в том числе, %: в берилле – 0.65, фенаките – 0.2, берtrandите – 0.17, хризоберилле – 0.11, гельвине – 0.1, гадолините – 0.06, бецоите  $< 0.01$ .

В верхней части континентальной коры средние содержания, %: **Mg** – 1.77, **Ca** – 3.89. Больше половины их масс сосредоточено в осадочных и параметаморфических породах: **Mg** – 59.33, **Ca** – 66.84%. Установлено следующее распределение масс **Mg** по минералам, %: в немагневых – 7.65, магневых – 93.13. В максиминералах сконцентрировано 5.85% масс **Mg** (в пенине – 3.22, серпентине – 1.05, оливине – 0.54, энстатите – 0.52, магнезите – 0.24, форстерите – 0.22, клиногумите – 0.03, гумите – 0.02, брусите – 0.01). Распределение массы **Ca** по минералам, %: в кальциевых – 94.97, некальциевых – 3.38. В максиминералах сконцентрировано 39.21% масс **Ca**, в том числе: в кальците – 37.5, апатите – 1.32, арагоните – 0.36, флюорите – 0.03.

В верхней части континентальной коры средние содержания, %: **Sr** – 0.027, **Ba** – 0.051. Больше половины их масс сосредоточено в метаморфических породах, %: **Sr** – 61.53, **Ba** – 64.08%. В верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано: **Sr** – 0.4% (в целестине – 0.26, барите – 0.14); **Ba** – 0.99% (в барите – 0.72, голландите – 0.15, псиломелане – 0.07, целестине – 0.05).

Среднее содержание **B** в верхней части континентальной коры 0.0034%. Среднее содержание **B** в осадочных и параметаморфических породах – 0.0072 и 0.0034%. 77.37% масс **B** находится в осадочных и параметаморфических породах, в которых сконцентрировано 4.08% его масс, в том числе, %: в турмалине – 3.91, корнерупине – 0.16, аксините – 0.01%.

Среднее содержание **Al** в верхней части континентальной коры 7.61%. 51.88% масс **Al** находится в осадочных и параметаморфических породах, для каждой из которых определено распределение масс **Al** по участкам с его содержанием, %: низким ( $< 5.3$ ), преобладающим (5.3–10.6), повышенным

(10.6–15.87) и высоким ( $> 15.87$ ). Массы Al распределены в этих участках соответственно, %: 2.22–26.5; 71.5–75.59; 0.97–15.61 и 0–8. Алюминиевые максиминералы находятся преимущественно в участках с преобладающим повышенным и высоким содержанием Al. Установлено, что в верхней части континентальной коры в алюминиевых максиминералах сконцентрировано 2.66% всей массы Al, в том числе, %: в силлиманите – 1.33, диаспоре – 0.33, андалузите – 0.27, гибbsite – 0.19, ставролите – 0.19, бемите – 0.11, шпинели – 0.11, дистене – 0.09, корунде – 0.03, сапфирине – 0.01.

Среднее содержание C в верхней части континентальной коры 0.81%. Среднее содержание C в осадочных и параметаморфических породах 2.87 и 0.62%. 97.59% масс C находится в осадочных и параметаморфических породах. В верхней части континентальной коры почти вся масса C сконцентрирована в собственных минералах и органических веществах, в том числе, %: в графите – 14.8, органических веществах – 12.58.

Среднее содержание Si в верхней части континентальной коры 28.32%. 65.11% масс Si находится в метаморфических породах. В максиминералах сконцентрировано 41.45% массы Si, в том числе, %: в кварце – 39.54, опале – 1.91.

Среднее содержание Ge в верхней части континентальной коры  $1.3 \cdot 10^{-4}$ %. 59.62% масс Ge находится в осадочных и параметаморфических породах.

Среднее содержание Sn в верхней части континентальной коры  $3.5 \cdot 10^{-4}$ %. 71.29% масс Sn находится в метаморфических породах. В верхней части континентальной коры 0.66% массы Sn сконцентрировано в касситерите.

Среднее содержание Pb в верхней части континентальной коры 0.0017%. 69.79% масс Pb находится в метаморфических породах. В максиминералах сконцентрировано 1.02% массы Pb, в том числе, %: в галените – 0.97, церуссите – 0.03, англезите – 0.01, свинце самородном – 0.01.

Среднее содержание N в верхней части континентальной коры 0.0106%. Среднее содержание N в осадочных породах 0.042%, в которых сконцентрировано 79.59% его масс.

Среднее содержание P в верхней части континентальной коры – 0.069%. 60.51% масс P находится в метаморфических породах. В фосфатах сконцентрировано 35.67% масс P, в том числе, %: в апатите – 33.54, карбонат-апатите – 1.89, монаците – 0.23, ксенотиме – 0.01.

Среднее содержание As в верхней части континентальной коры  $5.6 \cdot 10^{-4}$ %. Среднее содержание As в осадочных и параметаморфических породах  $7.7 \cdot 10^{-4}$  и  $9.2 \cdot 10^{-4}$  %, в которых находится 84.44% его масс. Установлено, что в мышьяковых минералах сконцентрировано 1.61% массы As, в том числе, %: в арсениопирите – 0.71, никелине – 0.5, герсдорфите – 0.24, аурипигменте – 0.09, кобальтине – 0.07.

Среднее содержание Sb в верхней части континентальной коры  $8.1 \cdot 10^{-5}$ %. 73.77% масс Sb находится в осадочных и параметаморфических породах. В сурьмяных минералах сконцентрировано 0.059% масс Sb, в том числе, %: в пираргирите – 0.02, тетраэдрите – 0.017, фрейбергите – 0.01, стефаните – 0.007, антимоните – 0.004, джемсоните – 0.001.

Среднее содержание Bi в верхней части континентальной коры  $2.9 \cdot 10^{-5}$ %. Среднее содержание Bi в осадочных и параметаморфических породах  $2.6 \cdot 10^{-5}$

и  $5.4 \cdot 10^{-5} \%$ , в которых находится 82.59% его масс. В висмутовых минералах сконцентрировано 0.74% масс Bi, в том числе, %: в бисмутите – 0.31, висмутине – 0.25, висмуте самородном – 0.15, тетрадимите – 0.03.

Среднее содержание **O** в верхней части континентальной коры 47.87%. Среднее содержание O в осадочных породах 48.51%. 55.24% масс O находится в осадочных и параметаморфических породах.

Среднее содержание **S** в верхней части континентальной коры 0.14%. Среднее содержание S в осадочных породах 0.36%. В осадочных и параметаморфических породах сосредоточено 74.3% всей массы S, имеющейся в верхней части континентальной коры. В максиминералах сконцентрировано 43.47% масс S, в том числе, %: в пирите – 24.08, пирротине – 7.98, ангидрите – 7.49, гипсе – 3.1, марказите – 0.46, кизерите – 0.11, барите – 0.07, сере самородной – 0.06, ярозите – 0.04, халькопирите – 0.03, целестине и пентландите – по 0.02, сфалерите – 0.01.

Среднее содержание **Se** в верхней части континентальной коры  $1.5 \cdot 10^{-5} \%$ . Среднее содержание Se в осадочных породах  $2.7 \cdot 10^{-5} \%$ . В осадочных и параметаморфических породах сосредоточено 78.01% всей массы Se. В максиминералах сконцентрировано 0.0011% масс Se, в том числе, %: в висмутине – 0.0009 и киновари – 0.0002%.

Среднее содержание **F** в верхней части континентальной коры 0.051%, среднее содержание F в осадочных породах 0.047%. 60.05% масс F находится в метаморфических породах. В верхней части континентальной коры в собственных минералах сконцентрировано 7.3% масс F, в том числе, %: в апатите – 4.84, флюорите – 2.08, топазе – 0.18, гумите – 0.08, клиногумите – 0.07, бастнезите – 0.05.

Среднее содержание **Cl** в верхней части континентальной коры 0.15%. Среднее содержание Cl в осадочных породах – 0.65%, в которых сконцентрировано 87.64% масс Cl. В верхней части континентальной коры в собственных минералах находится 73.04% масс Cl, в том числе, %: в галите – 72.58, сильвине – 0.21, скаполите – 0.19, карналлите – 0.05, бишофите – 0.01, содалите –  $< 0.01 \%$ .

Среднее содержание **Cu** в верхней части континентальной коры 0.0039%. 70.8% масс Cu сосредоточено в метаморфических породах. В верхней части континентальной коры в медных минералах сконцентрировано 1.186% масс Cu, в том числе, %: в халькопирите – 0.975, ковеллине – 0.06, борните – 0.036, азурите – 0.035, кубаните – 0.035, малахите – 0.029, меди самородной – 0.011, халькозине – 0.004, блеклых рудах – 0.001.

Среднее содержание **Ag** в верхней части континентальной коры  $1.1 \cdot 10^{-5} \%$ . 62.36 % масс Ag находится в осадочных и параметаморфических породах. Для каждой из горных пород определено распределение масс Ag по участкам с его содержанием, %: низким ( $< 6 \cdot 10^{-6}$ ), средним ( $6 \cdot 10^{-6}$ – $1.8 \cdot 10^{-5}$ ), повышенным ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ – $1.62 \cdot 10^{-4}$ ) и высоким ( $1.62 \cdot 10^{-4}$ – $4.86 \cdot 10^{-4}$ ). Распределение масс Ag в разных горных породах по таким участкам соответственно, %: 4.81–33.04; 13.94–46.81; 28.8–69.89; 0–33.22. Предполагается, что в максиминералах сконцентрировано 2.62% всей массы Ag, в том числе, %: в серебре самородном – 0.99, аргентите – 0.56, пираргирите – 0.4, акантите – 0.31, стефаните – 0.22, фрейбергите – 0.07, хлораргирит-

те – 0.03, золоте самородном – 0.02, меди самородной – 0.01, тетраэдри-  
те – 0.01.

Среднее содержание **Au** в верхней части континентальной коры  $4.36 \cdot 10^{-7} \%$ , 97.4% масс которой представлено горными породами с содержанием **Au**  $< 1 \cdot 10^{-6} \%$ . В них находится 73.5% масс **Au**. Около 2.6% массы континентальных пород имеет содержание **Au**  $1 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-5} \%$ . В них сконцентрировано 23.4% масс **Au**. Содержанием **Au**  $5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-3} \%$ , соответствующим промышленным и потенциально промышленным рудам, характеризуется около 0.01% масс верхней части континентальной коры. Здесь сконцентрировано 3.1% масс **Au**. Распределение **Au** в совокупности континентальных пород почти, пропорциональное их массам, практически соответствует геохимическому балансу. Главные носители **Au** – метаморфические породы. Зависимость среднего содержания **Au** от состава горных пород выражена слабо. В самородном золоте сконцентрировано 4.1–4.6% массы **Au**, имеющейся в верхней части континентальной коры.

В верхней части континентальной коры среднее содержание, %: **Zn** – 0.0075%, **Cd** –  $6.4 \cdot 10^{-5} \%$ , **Hg** –  $6.5 \cdot 10^{-6} \%$ . В метаморфических породах находится 68.38% масс **Zn**, 66.04% масс **Cd** и 67.54% масс **Hg**. В сфалерите сконцентрировано 0.31% всей массы **Zn** и 0.32% всей массы **Cd**. В максиминералах сконцентрировано 0.771% всей массы **Hg**, в том числе, %: в киновари – 0.757, метациннабарите – 0.01, блеклых рудах – 0.003, реальгаре – 0.001.

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: **Sc** – 0.0016, **Y** – 0.0026 и **La** – 0.0032. В метаморфических породах находится, %: 71.98% масс **Sc**, 51.7% масс **Y**, 59.5% масс **La**. В максиминералах сконцентрировано 4.25% масс **Y**, в том числе, %: в ортите – 1.85, монаците – 1.45, ксенотиме – 0.69, иттриалите – 0.14, гадолините – 0.06, эвксените – 0.03, фергусоните – 0.02, блонстрандине – 0.01. В максиминералах сконцентрировано 12.69% масс **La**, в том числе, %: в ортите – 6, монаците – 5.28, бастнезите – 1.4, гадолините – 0.01.

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: **Ce** – 0.0063 и **Pr** –  $8.7 \cdot 10^{-4}$ . В метаморфических породах находится: 66.3% масс **Ce**, 71.7% масс **Pr**. В максиминералах сконцентрировано 11.96% масс **Ce**, в том числе, %: в ортите – 5.64, монаците – 5.06, бастнезите – 1.26; 12.06% масс **Pr**, в том числе, %: в монаците – 5.98, ортите – 4.86, бастнезите – 1.21, гадолините – 0.01.

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: **Nd** – 0.0029, **Sm** –  $5.7 \cdot 10^{-4}$ . В метаморфических породах находится 68.1% масс **Nd** и 60.3% масс **Sm**. В максиминералах сконцентрировано 9.13% масс **Nd**, в том числе, %: в монаците – 5.38, ортите – 3.48, бастнезите – 0.25, иттриалите – 0.01, гадолините – 0.01%; 7.43% масс **Sm**, в том числе, %: в монаците – 3.88, ортите – 3.2, бастнезите – 0.28, иттриалите – 0.03, гадолините – 0.02, эвксените 0.01, фергусоните – 0.01.

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: **Eu** –  $1.3 \cdot 10^{-4}$ , **Gd** –  $6.3 \cdot 10^{-4}$ . В метаморфических породах находится: 67.46% масс **Eu** и 70.93% масс **Gd**. В максиминералах сконцентрировано 1.87% масс **Eu**, в том числе, %: в монаците – 0.9, ортите – 0.7, бастнезите – 0.25, иттриалите – 0.01, фергусоните – 0.01; 4.24% масс **Gd**, в том числе, %: в монаците – 2.48,



ортите – 1.45, ксенотиме – 0.13, бастнезите – 0.1, иттриалите – 0.05, гадолините – 0.01, эвксените 0.01, фергусоните – 0.01.

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: **Tb** –  $8.9 \cdot 10^{-5}$ , **Dy** –  $4.8 \cdot 10^{-4}$ . В метаморфических породах находится 64.3% масс Tb и 68.2 масс Dy. В максиминералах сконцентрировано 9.71% масс Tb, в том числе, %: в ортите – 7.01, монаците – 2.34, ксенотиме – 0.21, иттриалите – 0.1, фергусоните – 0.02, гадолините – 0.02, эвксените – 0.01; 5.42% масс Dy, в том числе, %: в ортите – 4.5, монаците – 0.43, ксенотиме – 0.29, иттриалите – 0.14, фергусоните – 0.03, эвксените 0.02, гадолините – 0.01.

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: **No** –  $1.3 \cdot 10^{-4}$ , **Er** –  $2.7 \cdot 10^{-4}$ . В метаморфических породах находится 68.19% масс No и 68% масс Er. В максиминералах сконцентрировано 4.43% масс No, в том числе, %: в ортите – 3.32, ксенотиме – 0.89, иттриалите – 0.1, бастнезите – 0.05, эвксените – 0.03, фергусоните – 0.02, гадолините – 0.02; 4.51% масс Er, в том числе, %: в ортите – 3.73, ксенотиме – 0.47, иттриалите – 0.18, фергусоните – 0.06, эвксените – 0.04, гадолините – 0.01, блонстрандине – 0.01, чевкините – 0.01.

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: **Yb** –  $2.5 \cdot 10^{-4}$ , **Lu** –  $4.8 \cdot 10^{-5}$ . В метаморфических породах находится: 61.1% масс Yb и 59.2% масс Lu. В максиминералах сконцентрировано 6.47% масс Yb, в том числе, %: в ортите – 5.74, ксенотиме – 0.34, иттриалите – 0.26, эвксените – 0.06, фергусоните – 0.05, гадолините – 0.01, блонстрандине – 0.01; 6.87% масс Lu, в том числе, %: в ортите – 6, ксенотиме – 0.58, иттриалите – 0.2, фергусоните – 0.06, эвксените – 0.03.

В верхней части континентальной коры среднее содержание, %: **Th** –  $9.1 \cdot 10^{-4}$ , **U** –  $2.5 \cdot 10^{-4}$ . 56.2% масс Th находится в метаморфических породах, 56% масс U – в осадочных породах и продуктах их метаморфизма. В максиминералах сконцентрировано 17.47% масс Th, в том числе, %: в монаците – 8.29, ортите – 5.8, торите – 3.08, иттриалите – 0.14, уранините – 0.02, ксенотиме – 0.12, фергусоните – 0.01, эвксените – 0.01; 5.72% масс U, в том числе, %: в ортите – 2.11, уранините – 1.83, монаците – 1.4, эвксените – 0.15, иттриалите – 0.11, фергусоните – 0.02, торите – 0.08, циртолите – 0.01, блонстрандине – 0.01.

Среднее содержание **Ti** в верхней части континентальной коры 0.39%. 67.25% масс Ti находится в метаморфических породах. В титановых минералах сконцентрировано 30.07% масс Ti, в том числе, %: в ильмените – 14.2, Ti-магнетите – 1.96, титаните – 11.1, рутиле – 1.62, лейкоксене – 0.92, анатазе – 0.27.

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: **Zr** – 0.016 и **Hf** –  $4.5 \cdot 10^{-4}$ . В цирконе сконцентрировано 28.4% масс Zr и 24% масс Hf.

Среднее содержание **V** в верхней части континентальной коры 0.0121%. 71.99% V находится в метаморфических породах. В Ti-магнетите сконцентрировано 1.3% масс V.

Среднее содержание в верхней части континентальной коры, %: **Nb** – 0.0012, **Ta** – 0.00014. 61.35% масс Nb и 54.44% масс Ta находится в метаморфических породах. Установлено, что в верхней части континентальной ко-

ры в ниобиевых минералах сконцентрировано 0.71% масс Nb, в том числе, %: в ильменорутите – 0.26, колумбите – 0.26, эвксените – 0.09, фергусоните – 0.06, пирохлоре – 0.03, блонстрандине – 0.01. В ниобиевых и танталовых минералах сконцентрировано 1.58% масс Ta, в том числе, %: в ильменорутите – 0.8, колумбите – 0.34, эвксените – 0.28, пирохлоре – 0.02, танталите – 0.1, фергусоните – 0.02, блонстрандине – 0.02.

Среднее содержание **Cr** в верхней части континентальной коры 0.0092%. 74.72% масс Cr находится в метаморфических породах. В хромшпинелидах сконцентрировано 0.64% масс Cr.

Среднее содержание **Mo** в верхней части континентальной коры  $1.56 \cdot 10^{-4}$  %. 65.7% масс Mo сосредоточено в метаморфических породах. В максиминералах сконцентрировано 4.64% масс Mo, в том числе, %: в шеелите – 0.14, повеллите – 0.01, молибдените – 4.49.

Среднее содержание **W** в верхней части континентальной коры  $2.03 \cdot 10^{-4}$  %. 65.7% всей массы W сосредоточено в метаморфических породах. В максиминералах сконцентрировано 2.23% масс W, в том числе, %: в вольфрамите – 0.23, шеелите – 2.

Среднее содержание **Mn** в верхней части континентальной коры 0.077 %. 64.28 % масс Mn сконцентрировано в метаморфических породах. Предполагается, что в верхней части континентальной коры в марганцевых минералах сконцентрировано 7.02% всей массы Mn, в том числе, %: в брауните – 1.8, тефроите – 0.98, гаусманите – 0.93, спессартине – 0.73, родохрозите – 0.63, пиролюзите – 0.43, голландите – 0.41, кутнагорите – 0.31, псиломелане – 0.2, криптомелане – 0.14, манганите – 0.12, родоните – 0.12, Mn-кальците – 0.07, яacobите – 0.07, тодороките – 0.06, вернадите – 0.02.

Среднее содержание **Fe** в верхней части континентальной коры – 4.06%. 67.08 масс Fe сосредоточено в метаморфических породах. В максиминералах сконцентрировано 20.46% масс Fe, в том числе, %: в магнетите – 11.5, ильмените – 1.76, сидерите – 1.35, гематите – 1.35, гетите – 1.31, тюрингите – 1.06, Ti-магнетите – 0.91, пирите – 0.73, пирротине – 0.44, фаялите – 0.05, марказите – 0.01.

Среднее содержание **Co** в верхней части континентальной коры 0.0017%. 71.47% масс Co сосредоточено в метаморфических породах. В максиминералах сконцентрировано 0.28% масс Co, в том числе, %: в голландите – 0.14, псиломелане – 0.05, пентландите – 0.05, кобальтине – 0.02, виоларите – 0.01, арсенопирите – 0.01.

Среднее содержание **Ni** в верхней части континентальной коры 0.005%. 71.75 масс Ni сосредоточено в метаморфических породах. В максиминералах сконцентрировано 0.88% масс Ni, в том числе, %: в пентландите – 0.58, гарниерите – 0.11, ваэсите – 0.07, виоларите – 0.06, никелине – 0.04, герсдорфите – 0.02.

## SUMMARY

---

Chemical element distribution in the upper continental crust has been defined by the model of A.B. Ronov et al. (1990). Calculation has been made on the published results of the analyses of the most important rocks, including more than 3400 quantitative mineralogical analyses, published mainly in the USSR.

Average content of **H** in the upper continental crust comprises 0.167%. 71.43% of H mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In the upper continental crust in maximinerals it is concentrated 34.18% of total H mass. In particular, %: in ripidolite – 14.94, in clinocllore – 5.08, in chamosite – 3.89, in kaolinite – 2.44, in pennine – 2.27, in lawsonite – 1.78, in beidellite – 1.18, in thuringite – 0.81, in serpentine – 0.68, in goethite – 0.57, in thomsonite – 0.54.

Average content of **Li** in the upper continental crust is 0.0033%. 61.73% of Li mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In each of the rocks Li mass distribution is determined by Li content within areas: low ( $< 0.002\%$ ), average (0.002–0.005%), enriched (0.005–0.008%) and high ( $> 0.008\%$ ). Li mass distribution in such areas corresponds to, %: 0.5–49.8, 33.9–93.2, 3.1–54.4 and 0.6–17.5. It was established that in the upper continental crust in lithium maximinerals it is concentrated 8.34% of total Li mass. In particular, %: in Li-biotite – 6.9, in Li-muscovite – 1.42, in spodumene – 0.01, in lepidolite – 0.004, in zinnwaldite – 0.002, in protolithionite – 0.0002.

Average content of **Na** in the upper continental crust is 2.07%. 66.69% of Na mass is localized in metamorphic rocks. In the upper continental crust in halite it is concentrated 3.58% of total Na mass.

Average content of **K** in the upper continental crust is 2.23%. 62.35% of K mass is localized in metamorphic rocks. In the upper continental crust in maximinerals it is concentrated 51.92% of total K mass. In particular, %: in kalifeldspath – 51.9, in sylvine – 0.016, in carnallite – 0.0008.

Average content of **Rb** in the upper continental crust is 0.0098%. Average content of Rb in granite is 0.0205%. 53.54% of Rb mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In each of the rocks Rb mass distribution is determined by Rb content within the areas: low ( $< 0.005\%$ ), average (0.005–0.01%), enriched (0.01–0.03%), high (0.03–0.05%) and very high ( $> 0.05\%$ ). Rb mass distribution in such areas corresponds to, %: 0.7–76.24; 14.46–79.37; 5.1–47.15; 0–27.23 and 0–11.9. It was established that in the upper continental crust in rubidium maximinerals it is concentrated 0.3219% of total Rb mass. In particular, %: in Rb-biotite – 0.23, in Rb-muscovite – 0.091, in lepidolite – 0.0008, in protolithionite – 0.0001.

Average content of **Cs** in the upper continental crust makes up  $5.5 \cdot 10^{-4} \%$ . Average contents of Cs in clay rocks and acid volcanic rocks are  $1.3 \cdot 10^{-3} \%$  and  $1.5 \cdot 10^{-3} \%$ . 57.79% of Cs mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In each of the rocks Cs mass distribution is determined by Cs content within

areas: low ( $< 5 \cdot 10^{-4} \%$ ), average ( $5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3} \%$ ), enriched ( $1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3} \%$ ), high ( $5 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2} \%$ ) and very high ( $> 1 \cdot 10^{-2} \%$ ). Cs mass distribution in such areas corresponds to, %: 2.28–75.15; 6.32–56.41; 11.42–85.6; 0–25.46 and 0–26.26. It was determined that in the upper continental crust in cesium maximinerals it is concentrated 0.243% of total Cs mass. In particular, %: in Cs-biotite – 0.2, in beryl – 0.02, in Cs-glass – 0.018, in lepidolite – 0.004, in protolithionite – 0.001.

Average content of **Be** in the upper continental crust is  $2.3 \cdot 10^{-4} \%$ . 59.63% of Be mass is localized in metamorphic rocks. In each of the rocks Be mass distribution is determined by Be content within the areas: low ( $< 1 \cdot 10^{-4} \%$ ), average ( $1 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4} \%$ ), enriched ( $4 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3} \%$ ), and high ( $1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3} \%$ ). Be mass distribution in such areas corresponds to, %: 3.58–55.66, 10.46–59.22, 1.6–46.34, 0–27.95. In the upper continental crust in maximinerals it is concentrated 1.29% of total Be mass. In particular, %: in beryl – 0.65, in phenacite – 0.2, in bertrandite – 0.17, in chrysoberyl – 0.11, in helvite – 0.1, in gadolinite – 0.06, in behoite –  $< 0.01$ .

In the upper continental crust average contents are (%): **Mg** – 1.77, **Ca** – 3.89. More than half of their masses is located in sedimentary rocks and parametamorphic rocks (%): Mg – 59.33, Ca – 66.84%. It was established distribution of magnesium masses in minerals, %: in magnesium minerals – 93.13, in non magnesium minerals – 7.65. In the maximinerals it is concentrated 5.85% of magnesium masses: in pennine – 3.22, in serpentine – 1.05, in olivine – 0.54, in enstatite – 0.52, in magnesite – 0.24, in forsterite – 0.22, in clinohumite – 0.03, in humite – 0.02, in brucite – 0.01%. Distribution of Ca masses in minerals, %: in calcium minerals – 94.97, in non calcium minerals – 3.38. In the maximinerals it is concentrated 39.21% calcium masses (in calcite – 37.5, in apatite – 1.32, in aragonite – 0.36, in fluorite – 0.03%).

In the upper continental crust average contents are (%): **Sr** – 0.027, **Ba** – 0.051. More than half of their masses is localized in metamorphic rocks, (%): Sr – 61.53, Ba – 64.08%. In the upper continental crust in maximinerals are concentrated, %: Sr – 0.4 (in celestite – 0.26 in baryte – 0.14%), Ba – 0.99 % (in baryte – 0.72, in hollandite – 0.15, in psilomelane – 0.07, in celestite – 0.05%).

Average content of **B** in the upper continental crust is 0.0034%. Average contents of B in sedimentary rocks and metasedimentary rocks are 0.0072 and 0.0034%. 77.37% of B mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In B minerals are concentrated 4.08% of B masses. In particular, %: in tourmaline – 3.91, in kornerupine – 0.16, in axinite – 0.01%.

Average content of **Al** in the upper continental crust is 7.61%. 51.88% of Al mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In each of these rocks Al mass distribution is determined by Al content within the areas: low ( $< 5.3$ ), predominant (5.3–10.6), enriched (10.6–15.87) and high ( $> 15.87$ ). Aluminium mass distribution in such areas corresponds to, %: 2.22–26.5, 71.5–75.59, 0.97–15.61 and 0–8. Aluminium maximinerals occur predominantly in areas with enriched and high Al content. It has been found that in the upper continental crust in aluminium maximinerals it is concentrated 2.66% of total Al mass. In particular, %: sillimanite – 1.33, diaspore – 0.33, andalusite – 0.27, gibbsite – 0.19, staurolite – 0.19, boehmite – 0.11, spinel – 0.11, disthen – 0.09, corundum – 0.03, sapphirine – 0.01%.

Average content of **C** in the upper continental crust is 0.81%. C average contents in sedimentary rocks and metasedimentary rocks are 2.87 and 0.62%. 97.59% of C

mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In the upper continental crust C mass is concentrated in minerals proper and in organic substances. In particular, %: in graphite – 14.8, in organic substances – 12.58.

Average content of **Si** in the upper continental crust is 28.32%. 65.11% of Si mass is localized in metamorphic rocks. In the maximinerals the concentration is 41.45% of Si mass. In particular: in quartz – 39.54, in opal – 1.91%.

Average content of **Ge** in the upper continental crust is  $1.3 \cdot 10^{-4}$  %. 59.62% of Ge mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks.

Average content of **Sn** in the upper continental crust is  $3.5 \cdot 10^{-4}$  %. 71.29% of Sn mass is localized in metamorphic rocks. In the upper continental crust in the cassiterites the concentration is 0.66% of Sn mass.

Average content of **Pb** in the upper continental crust is 0.0017%. 69.79% of Pb mass is localized in metamorphic rocks. In the maximinerals it is concentrated 1.02% of Pb mass. In particular, %: in galena – 0.97, in cerussite – 0.03, in anglesite – 0.01, in lead 0.01%.

Average content of **N** in the upper continental crust is 0.0106%. N average content in sedimentary rocks is 0.042%. 79.59% of N mass is localized in sedimentary rocks.

Average content of **P** in the upper continental crust is 0.069%. 60.51% of P mass is localized in metamorphic rocks. In the phosphatic minerals the concentration is 35.67% of P mass. In particular, %: 33.54 – in apatite, 1.89 – in C-apatite, 0.23 – in monazite, 0.01 – in xenotime.

Average content of **As** in the upper continental crust is  $5.6 \cdot 10^{-4}$  %. As average contents in sedimentary rocks and metasedimentary rocks are  $7.7 \cdot 10^{-4}$  and  $9.2 \cdot 10^{-4}$  %. 84.44% of As mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In arsenic minerals the concentration is 1.61% of As mass. In particular, %: in arsenopyrite – 0.71, in niccolite – 0.5, in gersdorffite – 0.24, in auripigment – 0.09, in cobaltite – 0.07%.

Average content of **Sb** in the upper continental crust is  $8.1 \cdot 10^{-5}$  %. 73.77% of Sb mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In antimony minerals the concentration is 0.061% Sb masses. In particular, %: in pyrrargyrite – 0.02, in tetrahedrite – 0.017, in freibergite – 0.01, in stephanite – 0.007, in antimonite – 0.004, in jamesonite – 0.001.

Average content of **Bi** in the upper continental crust is  $2.9 \cdot 10^{-5}$  %. 82.59% of Bi mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In the bismuth minerals it is concentrated 0.74% of Bi mass. In particular, %: in bismuthite – 0.31, in bismuthine – 0.25, in bismuth – 0.15, in tetradyomite – 0.03%.

Average content of **O** in the upper continental crust is 47.87%. O average content in sedimentary rocks is 48.51%. 55.24% of O mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks.

Average content of **S** in the upper continental crust is 0.14%. Average content of S in sedimentary rocks is 0.36%. 74.3% of S mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In maximinerals it is concentrated 43.47% of S mass. In particular, %: in pyrite – 24.08%, in pyrrhotite – 7.98%, in anhydrite – 7.49%, in gypsum – 3.1%, in marcasite – 0.46, in kieserite – 0.11, in barite – 0.07, in sulphur – 0.06, in jarosite – 0.04, in chalcophyrite – 0.03, in celestite – 0.02, in pentlandite – 0.02, in sphalerite – 0.01.

Average content of **Se** in the upper continental crust is  $1.5 \cdot 10^{-5} \%$ . Average content of Se in sedimentary rocks is  $2.7 \cdot 10^{-5} \%$ . 78.01% of Se mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In the maximinerals it is concentrated 0.0011% of Se mass. In particular, %: 0.0009 – in bismuthine and 0.0002% in cinnabar.

Average content of **F** in the upper continental crust is 0.051%. Average content of F in sedimentary rocks is 0.047%. It was determined that 60.05% of F mass is localized in metamorphic rocks. In the upper continental crust in the minerals proper it is concentrated 7.3% of F mass. In particular, %: in apatite – 4.84, in fluor spar – 2.08, in topaz – 0.18, in gummite – 0.08, in clinohumite – 0.07 in bastna-site – 0.05%.

Average content of **Cl** in the upper continental crust is 0.15%. Average content of Cl in sedimentary rocks is 0.65%. 87.64% of Cl mass is localized in sedimentary rocks. In the upper continental crust in the minerals proper it is concentrated 73.04% of Cl mass. In particular, %: in halite – 72.58, in sylvite – 0.21, in scapolite – 0.19, in carnallite – 0.05, in bischofite – 0.01, in sodalite –  $< 0.01\%$ .

Average content of **Cu** in the upper continental crust is 0.0039%. 70.8% of Cu mass is localized in metamorphic rocks. In the upper continental crust in copper minerals it is concentrated 1.186% of Cu mass. In particular, %: in chalcopyrite – 0.975, in covellite – 0.06, in bornite – 0.036, in azurite – 0.035, in cubanite – 0.035, in malachite – 0.029, in copper – 0.011, in chalcocite – 0.004, in fahl ore – 0.001.

Average content of **Ag** in the upper continental crust is  $1.1 \cdot 10^{-5} \%$ . 62.36% of Ag mass is localized in sedimentary and parametamorphic rocks. In each of the rocks Ag mass distribution is determined by Ag content within areas: low ( $< 6 \cdot 10^{-6} \%$ ), average ( $6 \cdot 10^{-6}$ – $1.8 \cdot 10^{-5} \%$ ), enriched ( $1.8 \cdot 10^{-5}$ – $1.62 \cdot 10^{-4} \%$ ), and high ( $1.62 \cdot 10^{-4}$ – $4.86 \cdot 10^{-4} \%$ ). Ag mass distribution in such areas corresponds to, %: 4.81–33.04, 13.94–46.81, 28.8–69.89, 0–33.22. It is supposed that in maximinerals it is concentrated. 62% of total Ag mass. In particular, %: in silver – 0.99, in argentite – 0.56, in pyrargyrite – 0.4, in acanthite – 0.31, in stephanite – 0.22, in v freibergite – 0.07, in chlorargyrite – 0.03, in v gold – 0.02, in cuprum – 0.01, in tetrahedrite – 0.01.

Average content of **Au** in the upper continental crust is  $4.36 \cdot 10^{-7} \%$ . 97.4% of the upper continental crust mass is presented by the rocks containing  $\text{Au} < 1 \cdot 10^{-6} \%$ . Such rocks include 73.5% of total gold mass. Nearly 2.6% of the continental rock mass possesses about  $1 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-5} \%$  of gold in it. 23.4% of Au mass is concentrated in them. About 0.01% of the upper continental crust mass possesses the Au content about  $5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-3} \%$  corresponding to industrial and potentially industrial ores. About 3.1% of gold mass is concentrated in these rocks. The gold distribution in continental rocks is almost proportional to its (rocks) mass and practically corresponds to a geochemical balance. The main gold-bearing rocks are metamorphic. There is a very weak dependence between the average Au content and rock composition. In native gold it is concentrated about 4.1–4.6% of gold mass of the upper continental crust.

Average contents the in upper continental crust are: **Zn** – 0.0075%, **Cd** –  $6.4 \cdot 10^{-5} \%$ , **Hg** –  $6.5 \cdot 10^{-6} \%$ . 68.38% of Zn mass, 66.04% of Cd mass, 67.54% of Hg mass are localized in metamorphic rocks. In sphalerite the concentration is 0.31% of total Zn mass and 0.32% of total Cd mass. In maximinerals the concentration is 0.771% of total Hg mass. In particular, %: in cinnabarite – 0.757, in metacinnabarite – 0.01, in fahl ore – 0.003, in realgar – 0.001.

Average contents in the upper continental crust are: **Sc** – 0.0016%, **Y** – 0.0026% and **La** – 0.0032%. 71.98% of Sc mass, 51.7% of Y mass, 59.5% of La mass are localized in metamorphic rocks. In maximinerals the concentration is 4.25% of Y mass. In particular, %: in orthite – 1.85, in monazite – 1.45, in xenotime – 0.69, in yttrialite – 0.14, in gadolinite – 0.06, in euxenite – 0.03, in fergusonite – 0.02, in blomstrandine – 0.01%. In maximinerals the concentration is 12.69% of La mass. In particular, %: in orthite – 6, in monazite – 5.28, in bastnasite – 1.4, in gadolinite – 0.01.

Average contents in the upper continental crust are: **Ce** – 0.0063%, **Pr** –  $8.7 \cdot 10^{-4}$  %. 66.3% of Ce mass, 71.7% of Pr mass are localized in metamorphic rocks. In maximinerals the concentration is 11.96% of Ce mass. In particular, %: in orthite – 5.64, in monazite – 5.06, in bastnasite – 1.26%. In maximinerals the concentration is 12.06% of Pr mass. In particular, %: in monazite – 5.98, in orthite – 4.86, in bastnasite – 1.21%, in gadolinite – 0.01.

Average contents in the upper continental crust are: **Nd** – 0.0029%, **Sm** –  $5.7 \cdot 10^{-4}$  %. 68.1% of Nd mass, 60.3% of Sm mass are localized in metamorphic rocks. In the maximinerals the concentration of Nd mass is 9.13%. In particular, %: in monazite – 5.38, in orthite – 3.48, in bastnasite – 0.25%, in yttrialite – 0.01, in gadolinite – 0.01. In the maximinerals Sm mass concentration is 7.43%. In particular, %: in monazite – 3.88, in orthite – 3.2, in bastnasite – 0.28, in gadolinite – 0.02, in yttrialite – 0.03, in euxenite – 0.01, in fergusonite – 0.01.

Average contents in the upper continental crust are: **Eu** –  $1.3 \cdot 10^{-4}$  %, **Gd** –  $6.3 \cdot 10^{-4}$  %. 67.46% of Eu mass, 70.93% of Gd mass are localized in metamorphic rocks. In the maximinerals it is concentrated 1.87% of Eu mass. In particular, %: in monazite – 0.9, in orthite – 0.7, in bastnasite – 0.25, in yttrialite – 0.01, in fergusonite – 0.01%. In maximinerals it is concentrated 4.24% of Gd mass. In particular, %: in monazite – 2.48, in orthite – 1.45, in xenotime – 0.13, in bastnasite – 0.1, in yttrialite – 0.05, in gadolinite – 0.01, in euxenite – 0.01, in fergusonite – 0.01.

Average contents in the upper continental crust are: **Tb** –  $8.9 \cdot 10^{-5}$  %, **Dy** –  $4.8 \cdot 10^{-4}$  %. 64.3% of Tb mass and 68.2% of Dy mass are localized in metamorphic rocks. In the maximinerals it is concentrated 9.71% of Tb mass. In particular, %: in orthite – 7.01, in monazite – 2.34, in xenotime – 0.21, in yttrialite – 0.1, in fergusonite – 0.02, in gadolinite – 0.02, in euxenite – 0.01. In maximinerals it is concentrated 5.42% of Dy mass. In particular, %: in orthite – 4.5, in monazite – 0.43, in xenotime – 0.29, in yttrialite – 0.14, in fergusonite – 0.03, in euxenite – 0.02, in gadolinite – 0.01.

Average contents in the upper continental crust are: **Ho** –  $1.3 \cdot 10^{-4}$  %, **Er** –  $2.7 \cdot 10^{-4}$  %. 68.19% of Ho mass and 68% of Er mass are localized in metamorphic rocks.

In maximinerals it is concentrated 4.43% of Ho mass. In particular, %: in orthite – 3.32, in xenotime – 0.89, in yttrialite – 0.1, in bastnasite – 0.05, in euxenite – 0.03, in fergusonite – 0.02 in gadolinite – 0.02. In maximinerals it is concentrated 4.51% of Er mass. In particular, %: in orthite – 3.73, in xenotime – 0.47, in yttrialite – 0.18, in fergusonite – 0.06, in euxenite – 0.04, in gadolinite – 0.01, in blomstrandite – 0.01, in chevkinite – 0.01.

Average contents in the upper continental crust are: **Yb** –  $2.5 \cdot 10^{-4}$  %, **Lu** –  $4.8 \cdot 10^{-5}$  %. 61.1% of Yb mass and 59.2% of Lu mass is localized in metamorphic

rocks. In the maximinerals it is concentrated 6.47% of Yb mass. In particular, %: in orthite – 5.74, in xenotime – 0.34, in yttrialite – 0.26, in euxenite – 0.06, in fergusonite – 0.05 in gadolinite – 0.01, in blomstrandite – 0.01. In maximinerals it is concentrated 6.87% of Lu mass. In particular, %: in orthite – 6, in xenotime – 0.58, in yttrialite – 0.2, in fergusonite – 0.06, in euxenite – 0.03.

Average contents in the upper continental crust are: **Th** –  $9.1 \cdot 10^{-4}$  %, **U** –  $2.5 \cdot 10^{-4}$  %. 56.2% of Th mass is localized in metamorphic rocks. 56% of U mass is localized in sedimentary and metasedimentary rocks. In maximinerals it is concentrated 17.47% of Th mass. In particular, %: in monazite – 8.29, in orthite – 5.8, in thorite – 3.08, in yttrialite – 0.14, in uraninite – 0.02, in xenotime – 0.12, in fergusonite – 0.01, in euxenite – 0.01. In maximinerals the concentration of U mass is 5.72%. In particular, %: in orthite – 2.11, in uraninite – 1.83, in monazite – 1.4, in euxenite – 0.15, in yttrialite – 0.11, in fergusonite – 0.02, in thorite – 0.08, in cyrtolite – 0.01, in blomstrandite – 0.01.

Average **Ti** contents in the upper continental crust is 0.39%. 67.25% of Ti mass is localized in metamorphic rocks. In titanite minerals a concentration of Ti mass is 30.07%. In particular, %: in ilmenite – 14.2, in titanium-magnetite – 1.96, in titanite – 11.1, in rutile – 1.62, in leucoxene – 0.92, in anatase – 0.27.

Average contents in the upper continental crust are: **Zr** – 0.016%, **Hf** –  $4.5 \cdot 10^{-4}$  %. 63.6% of Zr mass and 69.5% of Hf mass are localized in metamorphic rocks. In the zircon cit is oncentrated 28.4% of Zr mass and 24% of Hf mass.

Average **V** content in the upper continental crust is 0.0121%. 71.99% of V mass is localized in metamorphic rocks. In titanium-magnetite it is concentrated 1.3% of V mass.

Average contents in the upper continental crust are: **Nb** – 0.0012, **Ta** – 0.00014%. 61.35% of Nb mass and 54.44% of Ta mass are localized in metamorphic rocks. In the niobium minerals it is concentrated 0.71% of Nb mass. In particular, %: in ilmenorutile – 0.26, in columbite – 0.26, in euxenite – 0.09, in fergusonite – 0.06, in pyrochlore – 0.03, in blomstrandite – 0.01. In the niobium minerals and in the tantalum minerals it is concentrated 1.58% of Ta mass. In particular, %: in ilmenorutile – 0.8, in columbite – 0.34, in euxenite – 0.28, in pyrochlore – 0.02, in tantalite – 0.1, in fergusonite – 0.02, in blomstrandite – 0.02.

Average content of **Cr** in the upper continental crust is 0.0092%. 74.72% of Cr mass is localized in metamorphic rocks. In chrome-spinel concentration there is 0.64% of Cr mass.

Average content of **Mo** in the upper continental crust is  $1.56 \cdot 10^{-4}$  %. 65.7% of Mo mass is localized in metamorphic rocks. In the maximinerals the concentration of Mo mass is 4.64%. In particular, %: in scheelite – 0.14, in powellite – 0.01, in molybdenite – 4.49.

Average content of **W** in the upper continental crust is  $2.03 \cdot 10^{-4}$  %. 65.7% of W mass is localized in metamorphic rocks. In maximinerals a concentration of W is 2.23%. In particular, %: in scheelite – 2%, in wolframite – 0.23.

Average content of **Mn** in the upper continental crust is 0.077. 64.28% of Mn mass is localized in metamorphic rocks of a granite-gneissic layer. It is supposed that in manganic minerals a concentration of Mn mass is 7.02%. In particular, %: in braunite – 1.8, in tephroite – 0.98, hausmanite – 0.93, in spessartine – 0.73, in rhodochrosite – 0.63, in pyrolusite – 0.43, in hollandite – 0.41, in kutnahorite – 0.31,



in psilomelane – 0.2, in cryptomelane – 0.14, in manganite – 0.12, in rhodonite – 0.12, in Mn-calcite – 0.07, in jacobsonite – 0.07, in todorokite – 0.06, in vernadite – 0.02.

Average content of **Fe** in the upper continental crust is 4.06%. 67.08 of Fe mass is localized in metamorphic rocks. In maximinerals it is concentrated 20.46% of Fe mass. In particular, %: in magnetite – 11.5, in ilmenite – 1.76, in siderite – 1.35, in hematite – 1.35, in goethite – 1.31, in thuringite – 1.06, in titanium-magnetite – 0.91, in pyrite – 0.73, in pyrrhotite – 0.44, in fayalite – 0.05, in marcasite – 0.01.

Average content of **Co** in the upper continental crust is 0.0017%. 71.47% of Co mass is localized in metamorphic rocks. In maximinerals it is concentrated 0.28 of Co mass. In particular, %: in hollandite – 0.14, in psilomelane – 0.05, in pentlandite – 0.05, in cobaltite – 0.02, in violarite – 0.01, in arsenopyrite – 0.01.

Average content of **Ni** in the upper continental crust is 0.005%. 71.75 of Ni mass is localized in metamorphic rocks. In maximinerals it is concentrated. 88% of Ni mass. In particular, %: in pentlandite – 0.58, in garnierite – 0.11, in vaesite – 0.07, in violarite – 0.06, in niccolite – 0.04, in gersdorffite – 0.02.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 9   |
| <b>Глава 1. СРЕДНИЙ СОСТАВ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ, ЕЕ СЛОЕВ И СЛАГАЮЩИХ ИХ ГОРНЫХ ПОРОД</b> .....                                                                                                                                                                                                                     | 16  |
| 1.1. СРЕДНИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 16  |
| 1.1.1. Исходные данные (16). 1.1.2. Обсуждение полученных данных (30). 1.1.3. Выводы (39).                                                                                                                                                                                                                                        |     |
| 1.2. СРЕДНИЙ МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 40  |
| 1.2.1. Методика определения средних содержаний минералов в горных породах (40). 1.2.2. Средний минеральный состав горных пород осадочного слоя (42). 1.2.3. Средний минеральный состав горных пород гранитно-гнейсового слоя (48). 1.2.4. Средний минеральный состав верхней части континентальной коры (64). 1.2.5. Выводы (75). |     |
| <b>Глава 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА И ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ</b> ..                                                                                                                                                                                                                                                                    | 77  |
| 2.1. ВОДОРОД, НАТРИЙ, КАЛИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 77  |
| 2.1.1. Средние содержания и распределение масс H, Na, K в верхней части континентальной коры (77). 2.1.2. Средний минеральный баланс H, Na, K в верхней части континентальной коры (79). 2.1.3. Выводы (83).                                                                                                                      |     |
| 2.2. ЛИТИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 83  |
| 2.2.1. Среднее содержание и распределение масс Li в верхней части континентальной коры (83). 2.2.2. Вариации концентрации масс Li в горных породах (85). 2.2.3. О минеральном балансе Li и вероятной роли максиминералов как его носителей (85). 2.2.4. Обсуждение полученных данных (90). 2.2.5. Выводы (91).                    |     |
| 2.3. РУБИДИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 91  |
| 2.3.1. Среднее содержание и распределение масс Rb в верхней части континентальной коры (91). 2.3.2. Вариации концентрации масс Rb в горных породах (92). 2.3.3. О минеральном балансе Rb и вероятной роли максиминералов как его носителей (93). 2.3.4. Обсуждение полученных данных (96). 2.3.5. Выводы (96).                    |     |
| 2.4. ЦЕЗИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 97  |
| 2.4.1. Среднее содержание и распределение масс Cs в верхней части континентальной коры (97). 2.4.2. Вариации концентрации масс Cs в горных породах (97). 2.4.3. О минеральном балансе Cs и вероятной роли максиминералов как его носителей (98). 2.4.4. Обсуждение полученных данных (102). 2.4.5. Выводы (102).                  |     |
| <b>Глава 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЩЕЛОЧНО-ЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ</b> ...                                                                                                                                                                                                                                                                     | 103 |
| 3.1. БЕРИЛЛИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 103 |
| 3.1.1. Среднее содержание и распределение масс Be в верхней части континентальной коры (103). 3.1.2. Вариации концентрации масс Be в горных породах (105). 3.1.3. О вероятной роли бериллиевых минералов как носителей Be (105). 3.1.4. Обсуждение полученных данных (109). 3.1.5. Выводы (110).                                  |     |
| 3.2. МАГНИЙ И КАЛЬЦИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 110 |
| 3.2.1. Среднее содержание и распределение масс Mg и Ca в верхней части континентальной коры (110). 3.2.2. Средний минеральный баланс Mg и Ca в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах (110). 3.2.3. Обсуждение имеющихся данных (120). 3.2.4. Выводы (121).                                           |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3. СТРОНЦИЙ И БАРИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 121        |
| 3.3.1. Среднее содержание и распределение масс Sr и Ba в верхней части континентальной коры (121). 3.3.2. Доли масс Sr и Ba, сконцентрированные в максиминералах (122). 3.3.3. Обсуждение полученных данных (125). 3.3.4. Выводы (125).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |            |
| <b>Глава 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ БОРА В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>127</b> |
| 4.1. БОР .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 127        |
| 4.1.1. Среднее содержание и распределение масс B в верхней части континентальной коры (127). 4.1.2. Доли масс B, сконцентрированные в турмалине и других борных минералах (127). 4.1.3. Обсуждение полученных данных (131). 4.1.4. Выводы (132).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |            |
| 4.2. АЛЮМИНИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 132        |
| 4.2.1. Среднее содержание и распределение масс Al в верхней части континентальной коры (132). 4.2.2. Вариации степени концентрации масс Al в осадочных и параметаморфических породах (133). 4.2.3. Среднее содержание алюминиевых максиминералов в осадочных породах и их роль как носителей Al (135). 4.2.4. О возможной роли досонита (давсонита) как носителя Al в осадочных породах (137). 4.2.5. Среднее содержание алюминиевых максиминералов в параметаморфических породах и их роль как носителей Al (138). 4.2.6. Роль алюминиевых максиминералов как носителей Al в магматических и оротаморфических породах (139). 4.2.7. Среднее содержание алюминиевых максиминералов и средний минеральный баланс Al в верхней части континентальной коры (140). 4.2.8. Минеральный баланс Al в парасланцах и парагнейсах, содержащих силлиманит (142). 4.2.9. Выводы (143). |            |
| <b>Глава 5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ УГЛЕРОДА ...</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>145</b> |
| 5.1. УГЛЕРОД .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 145        |
| 5.1.1. Среднее содержание и распределение масс C в верхней части континентальной коры (145). 5.1.2. Средний «минеральный» баланс C в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах (145). 5.1.3. Выводы (149).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |            |
| 5.2. КРЕМНИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 149        |
| 5.2.1. Среднее содержание и распределение масс Si в в верхней части континентальной коры (149). 5.2.2. Средний минеральный баланс Si в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах (149). 5.2.3. Выводы (152).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |            |
| 5.3. ГЕРМАНИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 153        |
| 5.3.1. Среднее содержание и распределение масс Ge в в верхней части континентальной коры (153). 5.3.2. О минеральном балансе Ge (153).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |            |
| 5.4. ОЛОВО .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 153        |
| 5.4.1. Среднее содержание и распределение масс Sn в верхней части континентальной коры (153). 5.4.2. О минеральном балансе Sn в горных породах и рудах (155). 5.4.3. Средние доли масс Sn, сконцентрированные в касситерите (157). 5.4.4. Выводы (159).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |            |
| 5.5. СВИНЕЦ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 159        |
| 5.5.1. Среднее содержание и распределение масс Pb в верхней части континентальной коры (159). 5.5.2. Средние доли масс Pb, сконцентрированные в свинцовых минералах (160). 5.5.3. Выводы (163).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |            |
| <b>Глава 6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ АЗОТА В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>164</b> |
| 6.1. АЗОТ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 164        |
| 6.1.1. О распределении N в верхней части континентальной коры (164).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |            |
| 6.2. ФОСФОР .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 164        |
| 6.2.1. Среднее содержание и распределение масс P в верхней части континентальной коры (164). 6.2.2. Доли масс P, сконцентрированные в фосфатах (166). 6.2.3. Обсуждение полученных данных (171). 6.2.4. Выводы (172).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |            |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3. МЫШЬЯК, СУРЬМА, ВИСМУТ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 172        |
| 6.3.1. Среднее содержание и распределение масс As, Sb, Bi в верхней части континентальной коры (172). 6.3.2. Средние доли масс As, Sb, Bi, сконцентрированные в собственных минералах (173). 6.3.3. Обсуждение полученных данных (179). 6.3.4. Выводы (180).                                                                                                                                                                                            |            |
| <b>Глава 7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ КИСЛОРОДА ..</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>181</b> |
| 7.1. КИСЛОРОД .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 181        |
| 7.1.1. Среднее содержание и распределение масс O в верхней части континентальной коры (181). 7.1.2. Средний минеральный баланс O верхней части континентальной коры (181).                                                                                                                                                                                                                                                                              |            |
| 7.2. СЕРА .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 181        |
| 7.2.1. Среднее содержание и распределение масс S в верхней части континентальной коры (181). 7.2.2. Доли масс S, сконцентрированные в ее собственных минералах (184). 7.2.3. Обсуждение полученных данных (188). 7.2.4. Выводы (189).                                                                                                                                                                                                                   |            |
| 7.3. СЕЛЕН .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 190        |
| 7.3.1. Среднее содержание и распределение масс Se в верхней части континентальной коры (190). 7.3.2. О вероятной роли максиминералов как носителей Se (190). 7.3.3. Выводы (191).                                                                                                                                                                                                                                                                       |            |
| <b>Глава 8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЛОГЕНОВ .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>192</b> |
| 8.1. СРЕДНЕЕ СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС F, Cl, Br, J В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 192        |
| 8.2. ДОЛИ МАСС F, СКОНЦЕНТРИРОВАННЫЕ В СОБСТВЕННЫХ МИНЕРАЛАХ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 192        |
| 8.3. ДОЛИ МАСС Cl, СКОНЦЕНТРИРОВАННЫЕ В СОБСТВЕННЫХ МИНЕРАЛАХ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 196        |
| 8.4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 197        |
| 8.5. ВЫВОДЫ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 198        |
| <b>Глава 9. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ МЕДИ .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>199</b> |
| 9.1. МЕДЬ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 199        |
| 9.1.1. Среднее содержание и распределение масс Cu в верхней части континентальной коры (199). 9.1.2. Доли масс Cu, сконцентрированные в медных минералах (199). 9.1.3. Обсуждение полученных данных (205). 9.1.4. Выводы (206).                                                                                                                                                                                                                         |            |
| 9.2. СЕРЕБРО .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 206        |
| 9.2.1. Среднее содержание и распределение масс Ag в верхней части континентальной коры (206). 9.2.2. Вариации концентрации масс Ag в горных породах (207). 9.2.3. Роль максиминералов в минеральном балансе Ag (207). 9.2.4. Обсуждение полученных данных (214). 9.2.5. Выводы (214).                                                                                                                                                                   |            |
| 9.3. ЗОЛОТО .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 214        |
| 9.3.1. Среднее содержание и распределение масс Au в верхней части континентальной коры (214). 9.3.2. Вариации концентрации масс Au в верхней части континентальной коры (215). 9.3.3. Минеральный баланс золота в горных породах и рудах (216). 9.3.4. О среднем содержании самородного золота в горных породах (217). 9.3.5. Роль самородного золота как носителя Au в горных породах и верхней части континентальной коры (220). 9.3.6. Выводы (222). |            |
| <b>Глава 10. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦИНКА, КАДМИЯ, РТУТИ .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>223</b> |
| 10.1. СРЕДНЕЕ СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС Zn, Cd и Hg В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 223        |
| 10.2. О СРЕДНЕМ СОДЕРЖАНИИ МАКСИМИНЕРАЛОВ И ИХ РОЛИ КАК НОСИТЕЛЕЙ Zn, Cd и Hg .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 225        |
| 10.3. О МИНЕРАЛЬНОМ БАЛАНСЕ Zn, Cd и Hg В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 227        |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 228        |
| 10.5. ВЫВОДЫ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 229        |
| <b>Глава 11. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ СКАНДИЯ ..</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>230</b> |
| 11.1. СКАНДИЙ, ИТРИЙ И ЛАНТАН .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 230        |
| 11.1.1. Среднее содержание и распределение масс Sc, Y и La в верхней части континентальной коры (230). 11.1.2. Доли масс Y и La, сконцентрированные в максиминералах (230). 11.1.3. Обсуждение полученных данных (235). 11.1.4. Выводы (236).                                                                                                     |            |
| 11.2. ЦЕРИЙ, ПРАЗЕОДИМ, НЕОДИМ, САМАРИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 236        |
| 11.2.1. Среднее содержание и распределение масс Ce, Pr, Nd и Sm в верхней части континентальной коры (236). 11.2.2. Доли масс Ce и Pr, сконцентрированные в максиминералах (238). 11.2.3. Доли масс Nd и Sm, сконцентрированные в максиминералах (242). 11.2.4. Обсуждение полученных данных (245). 11.2.5. Выводы (246).                         |            |
| 11.3. ЕВРОПИЙ, ГАДОЛИНИЙ, ТЕРБИЙ И ДИСПРОЗИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 246        |
| 11.3.1. Среднее содержание и распределение масс Eu, Gd, Tb и Dy в верхней части континентальной коры (246). 11.3.2. Доли масс Eu и Gd, сконцентрированные в максиминералах (246). 11.3.3. Доли масс Tb и Dy, сконцентрированные в максиминералах (251). 11.3.4. Обсуждение полученных данных (254). 11.3.5. Выводы (255).                         |            |
| 11.4. ГОЛЬМИЙ, ЭРБИЙ, ИТТЕРБИЙ И ЛЮТЕЦИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 255        |
| 11.4.1. Среднее содержание и распределение масс Ho, Er, Yb и Lu в верхней части континентальной коры (255). 11.4.2. Доли масс Ho и Er, сконцентрированные в максиминералах (257). 11.4.3. Доли масс Yb и Lu, сконцентрированные в максиминералах (259). 11.4.4. Обсуждение полученных данных (262). 11.4.5. Выводы (264).                         |            |
| 11.5. ТОРИЙ И УРАН .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 264        |
| 11.5.1. Среднее содержание и распределение масс Th и U в верхней части континентальной коры (264). 11.5.2. Роль максиминералов в минеральном балансе Th и U в горных породах (266). 11.5.3. Обсуждение полученных данных (271). 11.5.4. Выводы (273).                                                                                             |            |
| <b>Глава 12. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ ТИТАНА ....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>274</b> |
| 12.1. ТИТАН .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 274        |
| 12.1.1. Среднее содержание и распределение масс Ti в верхней части континентальной коры (274). 12.1.2. Средний минеральный баланс Ti в верхней части континентальной коры (274). 12.1.3. Средние доли масс титана, сконцентрированные в титановых минералах горных пород (277). 12.1.4. Обсуждение полученных данных (280). 12.1.5. Выводы (281). |            |
| 12.2. ЦИРКОНИЙ И ГАФНИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 281        |
| 12.2.1. Среднее содержание и распределение масс Zr и Hf в верхней части континентальной коры (281). 12.2.2. Доли масс Zr и Hf, сконцентрированные в максиминералах (281). 12.2.3. Обсуждение полученных данных (285). 12.2.4. Выводы (286).                                                                                                       |            |
| <b>Глава 13. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ ВАНАДИЯ ..</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>287</b> |
| 13.1. ВАНАДИЙ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 287        |
| 13.1.1. Среднее содержание и распределение масс V в верхней части континентальной коры (287). 13.1.2. О минеральном балансе V (287). 13.1.3. Выводы (290).                                                                                                                                                                                        |            |
| 13.2. НИОБИЙ И ТАНТАЛ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 291        |
| 13.2.1. Среднее содержание и распределение масс Nb и Ta в верхней части континентальной коры (291). 13.2.2. Доли масс Nb и Ta, сконцентрированные в ниобиевых и танталовых минералах (291). 13.2.3. Обсуждение полученных данных (295). 13.2.4. Выводы (296).                                                                                     |            |
| <b>Глава 14. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ ХРОМА .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>297</b> |
| 14.1. ХРОМ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 297        |
| 14.1.1. Среднее содержание и распределение масс Cr в верхней части континентальной коры (297). 14.1.2. Роль хромита как носителя Cr (297). 14.1.3. Выводы (300).                                                                                                                                                                                  |            |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 14.2. МОЛИБДЕН .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 300 |
| 14.2.1. Среднее содержание и распределение масс Mo в верхней части континентальной коры (300). 14.2.2. Роль максиминералов как носителей Mo (301). 14.2.3. Выводы (303).                                                                                                                                                       |     |
| 14.3. ВОЛЬФРАМ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 303 |
| 14.3.1. Среднее содержание и распределение масс W в верхней части континентальной коры (303). 14.3.2. Роль максиминералов как носителей вольфрама (303). 14.3.3. Выводы (305).                                                                                                                                                 |     |
| <b>Глава 15. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАРГАНЦА, ЖЕЛЕЗА, КОБАЛЬТА, НИКЕЛЯ</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 306 |
| 15.1. МАРГАНЕЦ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 306 |
| 15.1.1. Среднее содержание и распределение масс Mn в верхней части континентальной коры (306). 15.1.2. Вариации концентрации масс Mn в осадочных и параметаморфических породах (308). 15.1.3. О вероятной роли марганцевых минералов как носителей Mn (309). 15.1.4. Обсуждение полученных данных (313). 15.1.5. Выводы (313). |     |
| 15.2. ЖЕЛЕЗО .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 314 |
| 15.2.1. Среднее содержание и распределение масс Fe в верхней части континентальной коры (314). 15.2.2. Средний минеральный баланс Fe в верхней части континентальной коры и в слагающих ее горных породах (314). 15.2.3. Обсуждение имеющихся данных (319). 15.2.4. Выводы (320).                                              |     |
| 15.3. КОБАЛЬТ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 320 |
| 15.3.1. Среднее содержание и распределение масс Co в верхней части континентальной коры (320). 15.3.2. Доли масс Co, сконцентрированные в максиминералах (321). 15.3.3. Обсуждение полученных данных (324). 15.3.4. Выводы (324).                                                                                              |     |
| 15.4. НИКЕЛЬ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 325 |
| 15.4.1. Среднее содержание и распределение масс Ni в верхней части континентальной коры (325). 15.4.2. Доли масс Ni, сконцентрированные в максиминералах (325). 15.4.3. Обсуждение полученных данных (327). 15.4.4. Выводы (328).                                                                                              |     |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 329 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 336 |
| РЕЗЮМЕ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 364 |
| SUMMARY .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 371 |

*Научное издание*

**Николай Алексеевич Григорьев**

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ**

Рекомендовано к изданию  
ученым советом Института геологии и геохимии  
и НИСО УрО РАН

Редактор **Ю.Б. Корнилов**  
Технический редактор **Е.М. Бородулина**  
Корректоры **Н.В. Каткова, Г.Н. Старкова**  
Компьютерная верстка **Г.П. Чащиной**

ISBN 978-5-7691-2083-1



9 785769 120831

НИСО УрО РАН № 62(09)–109. Сдано в набор 08.10.09. Подписано  
в печать 21.12.09. Формат 70×100 1/16. Бумага типографская. Печать  
офсетная. Усл. печ. л. 30,96. Уч.-изд. л. 31. Тираж 200 экз. Заказ

Оригинал-макет изготовлен в РИО УрО РАН.  
620219, Екатеринбург, ГСП-169, ул. Первомайская, 91.