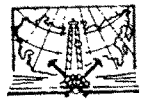
МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОЦЕНКА РЕСУРСОВ

глубоких подземных вод

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОЦЕНКА РЕСУРСОВ глубоких подземных вод

Под редакцией д-ра геол.-минер. наук,
проф. *С. С. БОНДАРЕНКО*, д-ра геол.-минер. наук,
проф. *Г. С. ВАРТАНЯНА*



МОСКВА „НЕДРА" 1986

УДК 553.7 : 556.3

Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод/Под редакцией. С. С. Бондаренко, Г. С. Вартаняна. — М.: Недра, 1986. 479 с., с ил.

Отражены основные достижения гидрогеологии в области разработки научных и методических основ поисков, разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Изложены результаты региональных исследований закономерностей распространения и формирования ресурсов различных типов подземных вод, методы изучения месторождений подземных вод на различных стадиях геологоразведочных работ. Особое внимание обращено на вопросы рационального и комплексного использования подземных вод в народном хозяйстве.

Для специалистов-гидрогеологов, занимающихся разведкой и освоением месторождений подземных вод.

Табл. 86, ил. 60, список лит.— 50 назв.

Рецензент: *И. С. Зекцер*, д-р геол.-минер. наук (Институт водных проблем АН СССР).

М $\frac{1904060000-355}{043(01)-86}$ 180—86

© Издательство «Недра», 1986

ВВЕДЕНИЕ

Подземные воды в СССР широко используются в народном хозяйстве. Они являются источниками хозяйственно-питьевого и производственного водоснабжения, а также орошения земель и обводнения пастбищ (пресные и солоноватые воды), применяются в качестве минерального сырья для добычи ценных рассеянных элементов, редких металлов и минеральных солей (промышленные воды); используются в бальнеологии и в качестве столовых питьевых вод в пищевой промышленности (минеральные воды), а также для целей энергетики и теплофикации (теплоэнергетические воды). Многообразие путей и важность использования подземных вод в различных отраслях народного хозяйства позволяет рассматривать их как одно из наиболее ценных полезных ископаемых. Изучение и оценка ресурсов и эксплуатационных запасов различных типов подземных вод является важной государственной задачей и осуществляется планомерно геологической службой страны.

Использование глубоких подземных вод позволяет решить самые разнообразные задачи:

— социальные, связанные с повышением уровня материального и культурного благосостояния, улучшением здоровья людей за счет расширения применения подземных минеральных вод в курортологической практике и для внекурортного лечения, теплоэнергетических вод — для теплоснабжения и расширения тепличного-парникового хозяйства страны;

— экономические, связанные с расширением масштабов применения глубоких подземных вод в качестве нового вида минерального сырья для промышленной добычи ценных рассеянных элементов, редких металлов, минеральных солей и их соединений;

— экологические, связанные с влиянием человеческой деятельности на окружающую среду, в том числе на условия формирования подземных вод и их месторождений и предотвращением такого влияния, охраной подземных вод от загрязнения и истощения.

Основными направлениями научных, методических и прикладных исследований в области изучения глубоких подземных вод являются следующие.

Региональные гидрогеологические исследования направлены на изучение различных типов подземных вод в пределах отдельных регионов и в целом для территории СССР, сопровождаются специализированным гидрогеохимическим и гидродинамическим картографированием и завершаются прогнозом ресурсов и эксплуа-

тационных запасов минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод.

Теоретические исследования связаны с изучением процессов и условий формирования глубоких подземных вод, процессов, способствующих накоплению в подземных водах полезных компонентов. Они направлены на исследование гидродинамических и термодинамических условий фильтрации жидкостей разной минерализации и состава, а также газов как в естественной природной обстановке, так и в условиях эксплуатации месторождений.

Основными задачами методических исследований являются разработка и совершенствование методов разведки и оценки запасов подземных промышленных, минеральных и термальных вод, методов геохимических поисков их месторождений, прогнозирования и регионального картирования этих вод, методов геолого-экономической оценки месторождений и перспектив их народнохозяйственного использования.

Прикладные производственно-методические исследования осуществляются непосредственно на разведуемых месторождениях подземных промышленных, минеральных и теплоэнергетических вод. При проведении этих исследований внедряются в практику и апробируются научные и методические разработки; завершаются они, как правило, подготовкой месторождений к практическому освоению.

Технологические исследования проводятся с целью разработки методов селективного извлечения редких элементов из различных типов подземных вод, а также технологии комплексной переработки подземных вод для извлечения всех полезных компонентов и минеральных солей. Это отвечает также задачам рационального использования полезных ископаемых и охраны окружающей природной среды от техногенного загрязнения.

Исследования региональных закономерностей распространения, гидрогеохимии и условий формирования подземных промышленных, минеральных и термальных вод позволили выделить на территории СССР провинции и области распространения этих вод, а также продуктивные водоносные горизонты и комплексы, к которым они приурочены. Установлено, что основные ресурсы минерализованных вод и рассолов, обогащенных специфическими компонентами, сосредоточены в пределах крупных платформенных артезианских бассейнов, в предгорных и межгорных впадинах. По минерализации и химическому составу они весьма неоднородны, однако статистический анализ показал, что основными аккумуляторами йода, брома, бора, лития, стронция, цезия, рубидия и других редких и рассеянных элементов являются хлоридные минерализованные воды и рассолы, составляющие около 90 % всех природных подземных вод.

К настоящему времени выполнена региональная оценка эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод для всех районов их распространения и для территории СССР в целом. Содер-

жание гидрогеологических исследований при этой оценке определялось особенностями месторождений различных типов вод и предусматривало необходимость изучения таких факторов, как закономерности изменения химического состава подземных вод и содержания в них полезных и специфических компонентов, растворенных и свободных газов (по площади артезианских бассейнов и гидрогеологических структур и в разрезе осадочных отложений); динамика подземных вод, пространственное изменение фильтрационных свойств пород и роль тектонической их нарушенности, трещиноватости; граничные условия месторождений, определяемые комплексом гидрогеологических факторов, в частности, условиями формирования месторождений, питания и разгрузки подземных вод; геолого-экономические показатели разработки месторождений (преимущественно промышленных и теплоэнергетических вод) при их освоении.

В соответствии с рассматриваемым кругом задач разработаны и применяются принципы и методы специального гидрогеологического картографирования ресурсов и запасов подземных минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод. Использование этих принципов и методов играет положительную роль в исследовании общих гидрогеологических закономерностей; изучении процессов формирования различных типов подземных вод; оценке параметров водоносных комплексов как на значительных территориях, так и на участках разведки и эксплуатации подземных вод; оценке связи гидрогеохимии с особенностями динамики глубоких подземных вод; анализе взаимосвязи водоносных горизонтов и выявлению масштабов и роли межпластовых перетоков в формировании химического состава и месторождений подземных вод. Эти исследования позволили создать научную гидрогеологическую основу для подсчета эксплуатационных запасов подземных минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод. Результаты региональной оценки эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод позволяют обоснованно планировать геологоразведочные работы и размещение производственных мощностей по розливу питьевых минеральных вод и добыче рассеянных элементов и редких металлов, размещение курортов и здравниц, крупных теплично-парниковых хозяйств и геотермальных электростанций. Правильность количественных прогнозов эксплуатационных запасов и условий их разработки подтверждена результатами геологоразведочных работ, выполненных в последние 15—20 лет.

Теоретическими исследованиями установлено, что на движение подземных вод в глубоких горизонтах существенное влияние оказывает ряд факторов, до настоящего времени не учитываемых при количественной оценке этого движения. Главными из них являются: высокая дисперсность фильтрационной среды, обусловливающая влияние на процессы фильтрации поверхностных сил; реологические свойства и неупругие деформации водовмещающих и водоупорных пород; температура и свободно выделяющийся при

снижении пластовых давлений газ; влияние на формирование естественного поля пластовых давлений в глубоких горизонтах не только гидродинамических, но также геодинамических факторов, в частности новейшей тектоники.

Определенный вклад в теорию формирования глубоких подземных вод крупных водонапорных систем вносят результаты гидрогеохимического анализа подземных вод и рассолов с целью динамического и ретроспективного изучения водонапорных систем, воссоздания на основе такого анализа эволюции состава океанических вод в фанерозое и в итоге — восстановление истории формирования подземных вод. Большое значение для оценки запасов и исследования условий формирования подземных минеральных, а также теплоэнергетических и промышленных, вод имеют получившие признание представления о гидроинжекционной природе их месторождений в замкнутых ограниченных структурах. Однако в области как теоретических гидродинамических исследований, так и гидрогеохимического анализа недр, палеогидрогеологических построений и гидрогеологических прогнозов ощущается недостаток в проведении фундаментальных экспериментальных лабораторных и натурных исследований.

Особенности глубоких подземных вод, а также условия их залегания и распространения создают трудности в проведении геологоразведочных работ и определяют требования к их поискам и разведке. Изучение и оценка месторождений минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод возможны лишь на широкой региональной гидрогеологической основе. Следствием особенностей распространения и условий залегания таких вод является их повышенная или высокая минерализация, температура и газонасыщенность, а также упругоемкость заключающих их водоносных горизонтов и комплексов. Это потребовало разработки принципиально новых теоретически обоснованных методов проведения гидрогеологических исследований при производстве геологоразведочных работ, методов анализа результатов исследований и оценки гидрогеологических параметров водоносных пород и подсчета запасов глубоких подземных вод.

В настоящее время разработаны общие принципы геологоразведочных работ на подземные минеральные, термальные и промышленные воды и методы подсчета эксплуатационных запасов их месторождений. Методика геологоразведочных работ определяет стадийность и последовательность изысканий, содержание, технику и технологию проведения гидрогеологических исследований на различных стадиях поисков и разведки применительно к задачам подготовки месторождений к практическому освоению. Усовершенствованы также методы гидрогеологических исследований глубоких скважин и обработки полученных результатов, позволяющие надежно определять основные расчетные гидрогеологические параметры, включая влияние на точность определения этих параметров таких факторов, как газлифт, термолифт, «скинэффект»,

возникающих практически во всех глубоких скважинах на минеральные, термальные и промышленные воды.

Вместе с тем опыт проведения геологоразведочных работ и эксплуатации минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод свидетельствует о том, что методика их поисков, разведки и оценки эксплуатационных запасов, в том числе излагаемая в общем виде в настоящей работе, требует дальнейшего усовершенствования применительно к гидрогеологическим условиям каждого месторождения и эксплуатационного участка, а также к особенностям состава подземных вод (в том числе степени их газонасыщенности).

Гидрогеологические изыскания и разработка месторождений глубоких подземных вод сопряжены с большими капитальными затратами на бурение, опытное опробование и эксплуатацию скважин. В связи с этим в каждом конкретном случае, особенно для промышленных и теплоэнергетических подземных вод, принципиальное значение имеет геолого-экономическое обоснование целесообразности их использования в народном хозяйстве. Разработанная методика геолого-экономического анализа позволяет обосновать перспективы освоения месторождений минеральных, теплоэнергетических и промышленных подземных вод для каждого месторождения и эксплуатационного участка, начиная со стадии поисков, и уточнить эти перспективы по мере детализации исследований.

Подземные воды глубоких горизонтов следует рассматривать как комплексное полезное ископаемое. Именно с этих позиций должно осуществляться их изучение как в аспектах выявления закономерностей распространения и условий формирования, так и в аспектах развития и совершенствования гидрогеологических основ и методов разведки и оценки эксплуатационных запасов их месторождений. Именно с этих позиций авторы настоящей работы подошли к изложению материала, характеризующего современное состояние научно-методических основ изучения глубоких подземных вод и ресурсы этих вод в различных районах страны.

В работе обобщаются достижения в области разработки научных и методических основ поисков и разведки месторождений минеральных, теплоэнергетических и промышленных подземных вод. Большое место отводится вопросам движения глубоких подземных вод в пористых средах и фильтрации жидкостей в слабопроницаемых глинистых отложениях; излагаются новые методические подходы к анализу региональной динамики глубоких подземных вод. Важное значение имеет исследование генезиса и процессов формирования общего химического, а также микрокомпонентного состава подземных вод в различных геолого-структурных и гидрогеологических условиях, свойственных древним и эпигерцинским платформенным областям, а также разновозрастным складчатым областям и районам современного вулканизма. Излагаются методы изучения месторождений глубоких подземных вод на различных стадиях геологоразведочных работ, анализируется состояние

разработки и использования методов картографирования минеральных, термальных и промышленных вод, основанных на изучении гидрогеохимических закономерностей, анализе региональной динамики подземных вод, а также прогнозе и оценке ресурсов и эксплуатационных запасов различных их типов.

В работе рассмотрены методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод применительно к особенностям месторождений и участков водозаборов, а также принципы и методы геолого-экономической оценки месторождений глубоких подземных вод различного назначения. Для полной характеристики закономерностей распространения и ресурсов различных типов подземных вод использован имеющийся в настоящее время фактический материал как по отдельным гидрогеологическим районам и областям, так и по территории СССР в целом. Особое внимание при этом обращается на комплексное использование глубоких подземных вод в качестве минеральных, теплоэнергетических и промышленных. Изучение и оценка этого вида полезного ископаемого свидетельствуют о том, что освоение и расширение использования глубоких подземных вод в народном хозяйстве будет в значительной мере способствовать увеличению гидроминерально-сырьевого и геотермального потенциала страны.

Часть I

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Глава 1

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЛОГИИ

Научно-исследовательские гидрогеологические работы в СССР осуществляются на широкой многоплановой основе, учитывающей необходимость решения главной задачи — ускорения темпов научно-технического прогресса на базе дальнейшего повышения уровня теоретических исследований, углубления методических разработок и совершенствования методов экспериментальных лабораторных и натурных исследований. Эти работы направлены на выполнение поставленных решениями Партии и Правительства задач:

— перспективного развития основных отраслей народного хозяйства страны, промышленного и сельскохозяйственного освоения новых природных экономических районов Сибири и Дальнего Востока, Казахстана и др.;

— осуществления крупных мероприятий по охране окружающей среды, рациональному и экономному использованию земной коры и природных ресурсов, в частности подземных вод;

— повышения качества и точности научных и гидрогеологических прогнозов, что наряду с обеспечением охраны окружающей среды при воздействии на нее техногенных процессов определяет правильность выбора принципиальных решений при расширении промышленного, гражданского и сельскохозяйственного строительства в уже экономически развитых районах и при освоении новых территорий;

— разработки и совершенствования методов и современных технических средств с целью повышения геологической информативности, экономической эффективности и качества гидрогеологических исследований.

Важным направлением является дальнейшее развитие гидрогеологии как научной дисциплины, применение знаний которой имеет в ряде случаев решающее значение для эффективного народнохозяйственного строительства. Научные исследования учитывают также структуру производственных гидрогеологических

работ в отрасли, выполняемых геологической службой страны, профили деятельности отраслевых научно-исследовательских организаций и традиционно сложившиеся направления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Вместе с тем, в связи с развитием народного хозяйства (в частности, новых его отраслей) и производительных сил во вновь осваиваемых районах страны, а также в связи с важностью проблем охраны недр и рационального и комплексного использования полезных ископаемых, появлением новых автоматизированных технических средств и методов решения прикладных задач, возникает необходимость перспективного развития исследований в новых направлениях и конкретизации их в уже сложившихся ранее.

Наиболее важным результатом региональных гидрогеологических исследований явилось завершение работ по составлению фундаментальной многотомной монографии «Гидрогеология СССР» и Атласа гидрогеологических и инженерно-геологических карт. Накопление, систематизация и обобщение фактических данных составляют основное содержание региональных гидрогеологических исследований. Дальнейшее развитие гидрогеологической науки связано с необходимостью усиления роли фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований на основе использования достижений точных наук — физики, химии, математики, а также интенсивного внедрения современных количественных методов в сфере научных и прикладных исследований.

Главной задачей региональных гидрогеологических исследований является дальнейшая разработка теории формирования подземных вод, разработка более совершенных методов гидрогеологического картирования. За последние 10—15 лет гидрогеологи добились значительных успехов в совершенствовании методов картирования, однако гидрогеологическая карта не содержит еще всей полноты необходимой информации о закономерностях формирования и распространения подземных вод, о многообразии сложных процессов в системе вода—порода, о количественном выражении этих процессов, характеризующих динамику их проявления. Гидрогеологическая карта не лишена недостатков также в связи с отсутствием общепринятой гидрогеологической стратификации. Принципы выделения водоносных горизонтов окончательно не разработаны. Большие трудности возникают при сопоставлении элементов гидрогеологических разрезов смежных регионов (гидрогеологических структур). В основе расчленения геологического разреза с выделением горных пород по характеру и степени водоносности лежит литолого-стратиграфический принцип. Геологическая стратификация требует своего совершенствования как по существу определяющих понятий (водоносный комплекс, водоносный горизонт и другие элементы гидрогеологического разреза), так и в основе своей, учитывающей главным образом литолого-стратиграфический принцип. Несомненным является то, что гидрогеологическая стратификация должна учитывать условия формирования водовмещающих и водоупорных толщ горных пород, осо-

бенности геолого-тектонического района (особенности формирования и развития гидрогеологической структуры) и др.

Гидрогеологическое картирование направлено в настоящее время главным образом на прослеживание гидрогеологических границ, получение информации о характере водовмещающих и водоупорных пород, распространении подземных вод, их качественных и количественных показателях, направлении движения, разгрузке и т. д. Картирование гидрогеологических процессов, тем более их количественная оценка при выполнении съемок общего назначения не осуществляется. Натурные эксперименты для изучения физико-химических процессов проводятся крайне недостаточно и заключаются они в осуществлении наблюдений по редкой сети скважин для изучения режима и баланса подземных вод (преимущественно грунтовых) в естественных и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях.

В связи с необходимостью опережающего изучения гидрогеологических условий территории СССР первостепенными задачами являются дальнейшая разработка теоретических основ районирования природных условий страны и создание применительно к такому районированию более совершенных методов средне- и мелкомасштабных гидрогеологических съемок.

Многообразие путей и перспективность использования подземных вод в различных отраслях народного хозяйства, о чем подробно будет сказано ниже, позволяет рассматривать их как одно из наиболее ценных полезных ископаемых. Поэтому разведка и оценка запасов подземных вод различных типов является важной государственной задачей и осуществляется в планомерном порядке геологической службой страны.

В настоящее время ресурсы пресных подземных вод изучаются в двух основных направлениях: а) выполняется региональная оценка естественных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод для учета их роли в общем водном балансе, обоснования генеральных схем комплексного использования водных ресурсов, а также планирования геологоразведочных работ; б) проводятся поиски, разведка и оценка эксплуатационных запасов подземных вод на локальных участках с целью разработки проектов водоснабжения городов, промышленных предприятий, сельских населенных пунктов, а в некоторых случаях орошения и обводнения земельных массивов.

Выполненная в СССР региональная оценка эксплуатационных запасов и естественных ресурсов пресных подземных вод позволила приблизительно определить их общую величину и закономерности формирования. Согласно этой оценке суммарная величина естественных ресурсов подземных вод на территории страны составляет 30 тыс. $м^3/с$, из которых около 30 % приходится на ее европейскую часть. Однако оценка эксплуатационных запасов выполнена только для хорошо изученной части территории СССР, составляющей около 50 % общей площади страны. Эксплуатационные запасы определены в количестве 10 тыс. $м^3/с$, около 50 %

которых составляют восполняемые запасы, формирующиеся за счет естественных ресурсов и привлечения поверхностного речного стока (эта часть ресурсов может быть использована в течение неограниченно долгого времени). Остальные 50 % эксплуатационных запасов определены исходя из условий сработки запасов подземных вод за 50-летний срок эксплуатации водозаборов.

В целом по стране городское хозяйственно-питьевое водоснабжение основано на подземных водах; за их счет удовлетворяют потребность в питьевой воде более 60 % городов. Примерно 20 % городов используют совместно подземные и поверхностные воды и лишь 20 % — только поверхностные; подземные воды являются также основным источником сельскохозяйственного водоснабжения и обводнения пастбищ.

Общий отбор пресных подземных вод в СССР оценивается в 700—750 м^3/с, в том числе для городского водоснабжения около 320 м^3/с. В перспективе водопотребление может возрасти до 2 тыс. м^3/с, что не превысит 20 % выявленных на сегодня эксплуатационных запасов. Однако из-за неравномерного распределения водных ресурсов по территории страны в ряде экономических районов ожидается, а в некоторых уже ощущается дефицит пресной воды. Поэтому в таких районах большое значение приобретает искусственное восполнение запасов питьевых подземных вод, играющее существенную роль пока только в районах осуществления крупных водохозяйственных мероприятий. В последние годы выполнены исследования, связанные с районированием территории СССР по условиям создания искусственных запасов подземных вод, с разработкой методики гидрогеологического обоснования искусственного восполнения подземных вод и оценкой эксплуатационных запасов.

Несмотря на достигнутые при изучении и использовании пресных подземных вод успехи, некоторые важные вопросы нуждаются в уточнении и проведении дополнительных исследований. Так, требуется продолжить исследования, позволяющие оценивать достоверность гидрогеологических прогнозов при подсчете эксплуатационных запасов подземных вод, а также разрабатывать количественные критерии этой оценки. Большое развитие должны получить исследования, направленные на выявление закономерностей формирования эксплуатационных запасов пресных подземных вод в различных природных условиях. Отличительной особенностью пресных подземных вод является их тесная связь с другими элементами природной среды. В связи с тем что подземные воды во многих случаях тесно связаны с поверхностными, при оценке их эксплуатационных запасов необходимо учитывать возможный «ущерб», наносимый поверхностному стоку при интенсивной эксплуатации подземных вод. С взаимодействием поверхностных и подземных вод тесно связана задача учета запасов последних в общих водохозяйственных балансах.

Одной из важнейших проблем гидрогеологии является изучение влияния отбора подземных вод на изменение экологической ситуа-

ции. Уже в настоящее время известны факты, когда слишком интенсивная эксплуатация подземных вод приводила к изменению общих ландшафтных условий территории, обмелению озер, просадкам земной поверхности, полному поглощению стока малых рек. Важно оценивать также влияние на ресурсы и режим подземных вод крупных гидротехнических и водохозяйственных мероприятий, в частности, связанных с перераспределением речного стока.

При решении перечисленных и многих других задач следует весьма тщательно изучать режим подземных вод. Научно-методические разработки в этом направлении открыли широкие возможности прогнозирования не только режима подземных вод в естественных условиях, но и изменения гидрогеологических процессов под влиянием гидротехнического, гражданского и промышленного строительства, мелиоративного освоения земель и т. д. Однако успешное решение стоящих перед гидрогеологической службой задач уже в настоящее время требует организации и проведения специальных натурных исследований и, в частности, целенаправленных наблюдений за режимом подземных вод в районах крупных водозаборов. Требует пересмотра и усовершенствования вся система наблюдений за режимом подземных вод на территории страны в целом.

Следует отметить, что перечисленные исследования необходимо сочетать с методами математического моделирования на аналоговых, цифровых и цифроаналоговых электронных устройствах, причем для ряда крупных (интенсивно эксплуатируемых) гидрогеологических регионов и месторождений подземных вод целесообразно создание их постоянно действующих математических моделей.

К числу важных проблем гидрогеологии относится расширение использования минеральных подземных вод в курортологической практике, во внекурортном лечении, для целей промышленного розлива, нужд фармацевтической и пищевой промышленности. К лечебным минеральным водам относятся и ультрапресные воды, и высокоминерализованные рассолы, порой с уникальными концентрациями растворенных веществ. Среди минеральных вод встречаются как пересыщенные газами различного состава, так и практически не содержащие сколько-нибудь заметных количеств растворенного газа; как холодные воды, так и гипертермальные растворы. К минеральным лечебным относятся природные подземные воды различного генезиса, характеризующиеся разнообразными условиями залегания и объединяемые в одну группу в значительной мере искусственно, с учетом лишь их благотворного воздействия на человеческий организм. Это обстоятельство делает проблему изучения подземных минеральных вод исключительно многоплановой и в силу этого особенно сложной.

В настоящее время в учении о подземных минеральных водах определились и получили развитие следующие основные направления:

— изучение региональных закономерностей распространения различных типов подземных минеральных вод;

— изучение ведущих геолого-геохимических процессов формирования состава минеральных вод;

— установление и исследование важнейших процессов, обусловливающих формирование и локализацию различных геолого-структурных типов месторождений минеральных вод;

— изучение закономерностей движения, накопления и изменения минеральных вод в пределах месторождений различных геолого-структурных типов.

Наряду с перечисленными теоретическими исследованиями развивались также прикладные, включающие: создание методических основ поисков, разведки и оценки запасов минеральных вод; разработку генеральной и частных типизаций месторождений подземных минеральных вод для целей разведки; совершенствование приемов и способов изучения вещественного состава подземных минеральных вод; создание новых и совершенствование существующих технических средств и приборов, предназначенные для обеспечения крупномасштабного геологоразведочного производства надежной научно-методической базой. Такие целенаправленные исследования дали возможность успешно решать конкретные практические задачи, существенным образом расширили диапазон знаний о сложных процессах формирования различных типов подземных вод в недрах, обусловили лучшее понимание определяющей роли воды в ряде ведущих геологических процессов.

На развитие научно-теоретических представлений о закономерностях размещения минеральных вод существенным образом повлиял сам характер отечественной геологоразведочной практики, являющейся в своей основе плановой и широкомасштабной. В настоящее время имеются достаточно разнообразные специализированные карты минеральных вод страны, выполненные в разные годы, в разных масштабах и по различным методикам; карты, дающие возможность судить о весьма широком разнообразии подземных минеральных вод, залегающих в различных геолого-генетических обстановках. Большинство этих карт, построенных на обширном фактическом материале, обеспечивают информацией качественного характера, но не отражают количественной стороны вопроса. Учитывая успешный опыт составления карт запасов промышленных и термальных подземных вод, развитых в пластовых системах, можно с известными коррективами такие методики применять и к оценке и картированию минеральных лечебных вод, также широко развитых в артезианских структурах.

В последние десять лет во ВСЕГИНГЕО вопросу региональной оценки запасов термоминеральных вод в горноскладчатых областях был посвящен довольно большой объем исследовательских работ. Базируясь на учете установленных закономерностей механизма гидроинжекции, для горноскладчатых территорий были выделены наиболее перспективные структуры — региональные и местные дренажные системы, где локализуется основная масса глубо-

ких термоминеральных вод, и далее произведена оценка их запасов. Была построена соответствующая карта в масштабе 1 : 5 000 000, которая отражает запасы минеральных вод практически для всего горноскладчатого пояса и платформенных областей СССР. Эта работа позволяет в настоящее время считать, что суммарные запасы углекислых вод составляют 16 м³/с, а азотных 10 м³/с.

Наиболее традиционным направлением в учении о минеральных водах является та его часть, которая посвящена исследованию ведущих геолого-геохимических процессов формирования состава минеральных вод. Современная гидрогеохимия в применении к изучению условий формирования состава минеральных вод базируется главным образом на теоретических построениях, хотя начиная с 60-х годов стали все чаще обращаться и к лабораторным исследованиям. К сожалению, следует отметить недостаточность теоретической базы, на которой строились и строятся те сравнительно немногочисленные гидрогеохимические эксперименты, которые призваны решать вопросы генезиса минеральных вод. Все еще слаба экспериментальная база, упрощены условия опытов. Впрочем, последнее, по-видимому, в значительной мере продиктовано именно отсутствием надлежащего оборудования. В частности, пока еще отсутствуют модели, воспроизводящие основные процессы формирования вещественного состава минеральных вод различного типа. По-видимому, единственно правильным в настоящее время является ассоциация гидрогеохимических исследований с работами, выполняемыми в области экспериментальной геохимии, минералогии, петрологии.

Недостаточно еще исследованы процессы, приводящие к формированию различных типов минеральных вод в горноскладчатых системах. В настоящее время развивается и внедряется в жизнь позиция, согласно которой в горноскладчатых системах подземные воды являются одним из продуктов активной жизни недр, в результате чего развиваются структуры, благоприятные для аккумуляции, движения и локализации флюидов глубинного и атмогенного происхождения, обеспечивается протекание физико-химических процессов в системе вода—порода и др.

В последнее время выполнен большой цикл работ по созданию специализированной типизации месторождений минеральных вод, базирующейся на учете как геологоструктурной обстановки, так и присущих ей гидродинамических условий, и охватывающей все разновидности минеральных вод. В настоящее время эта типизация принята как базовая при геологоразведочных работах и является составной частью действующей инструкции ГКЗ СССР по применению классификации запасов подземных вод и месторождениям минеральных вод.

Что касается задач об условиях формирования месторождений, то ввиду генетической пестроты используемых минеральных вод природа их месторождений также исключительно разнообразна и для познания ведущих процессов формирования требует большого

диапазона сложных исследовательских работ. Дальнейшие исследования должны учитывать как собственно гидрогеологические результаты геологоразведочных работ и научных изысканий, так и достижения в смежных дисциплинах, прежде всего в литологии, структурной геологии, тектонике, петрологии. Одним из ведущих направлений в изучении условий формирования месторождений минеральных вод должны стать исследования, связанные с глубокой проработкой закономерностей движения и локализации флюидов с различными физико-химическими параметрами в сложно построенных коллекторах и структурах.

Природные подземные растворы, чувствительные к смене термодинамической обстановки в недрах, способны существенным образом менять режим движения и условия формирования динамических скоплений. К числу наиболее актуальных проблем их изучения относятся:

— гидродинамические аспекты формирования состава минеральных вод, их физических характеристик в различных структурно-фациальных зонах;

— условия сосуществования в коллекторе вод с различными физико-химическими показателями; критические пределы изменения гидродинамических условий в коллекторе вследствие воздействия естественных или искусственных факторов, приводящих к нарушению качественных характеристик минеральных и неминеральных вод;

— закономерности движения высокогазонасыщенных минеральных вод в пласте и трещинно-жильной системе в условиях выделения спонтанного газа (естественные процессы, искусственные факторы различной интенсивности);

— закономерности формирования и локализации в недрах ресурсов и запасов минеральных вод различных таксономических рангов и порядков, применительно к платформенным и горно-складчатым регионам;

— закономерности сосуществования и взаимодействия в условиях интенсивной эксплуатации динамичных месторождений минеральных вод в ограниченных водонапорных системах.

В области разработки прикладных вопросов изучения минеральных вод в последние 2—3 десятилетия выполнен ряд исследований, позволивших разработать руководства, инструктивные материалы и специальные пособия, в которых изложены принципиальные положения геологоразведочного дела. Отечественная гидрогеология, по сравнению с зарубежной, располагает теоретически более обоснованными прогрессивными комплексными методами, лучше систематизированными методиками и приемами, учитывающими главные принципы геологоразведочного дела — последовательность и экономическую эффективность работ по выявлению и включению в эксплуатацию гидроминеральных богатств страны.

К промышленным водам относятся подземные воды и рассолы, содержащие полезные компоненты или их соединения в количест-

вах, обеспечивающих в конкретных гидрогеологических условиях их рентабельную добычу при переработке этих вод современными техническими средствами. Интерес к использованию подземных вод в качестве промышленного минерального сырья связан с вовлечением в сферу практического потребления полезных ископаемых новых видов, а также с рядом преимуществ подземных вод по сравнению с традиционными сырьевыми источниками рассеянных элементов и редких металлов.

Промышленные подземные воды характеризуются обычно широким региональным распространением и большими геологическими и эксплуатационными запасами. Они, как правило, являются поликомпонентным сырьем и в ряде случаев могут одновременно использоваться в бальнеологии и теплоэнергетике. Добыча подземных вод не требует проведения дорогостоящих горных работ и осуществляется с помощью скважин, что позволяет получать эти воды с достаточно больших глубин; на поверхности гидроминеральное сырье может дополнительно обогащаться путем концентрирования (например, испарением).

Рентабельность промышленного использования подземных вод доказана практикой. Утверждение о возможности и целесообразности их использования базируется на анализе региональных гидрогеологических закономерностей, результатах прогнозирования эксплуатационных запасов, опыте многолетней разработки месторождений подземных йодобромных вод в СССР и некоторых типов редкометальных вод за рубежом.

Изучение подземных промышленных вод осуществляется в следующих направлениях: исследуются региональные закономерности распространения, геохимия и условия формирования; масштабы накопления и формирования естественных запасов, дается прогнозная региональная оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных промышленных вод на гидрогеологической (гидродинамической и гидрогеохимической) и геолого-экономической основе; обосновывается выбор перспективных участков месторождений для проведения поисково-разведочных работ; совершенствуются и повышаются геологическая и экономическая эффективность геологоразведочных работ для оценки эксплуатационных запасов подземных промышленных вод.

Исследование региональных закономерностей распространения, гидрогеохимии и условий формирования подземных промышленных вод позволило выделить провинции и области их распространения, а также продуктивные водоносные горизонты и комплексы, к которым они приурочены. Установлено, что основные ресурсы сосредоточены в пределах крупных платформенных артезианских бассейнов, предгорных и межгорных впадин. По составу и минерализации эти воды неоднородны, однако статистический анализ показал, что основными аккумуляторами йода, брома, лития, рубидия, цезия, стронция, бора и других редких и рассеянных элементов являются хлоридные и минерализованные воды и рассолы, составляющие примерно 90 % всех природных подземных вод. За-

легают промышленные воды на больших глубинах, исчисляемых сотнями метров и километрами.

К настоящему времени выполнена региональная оценка прогнозных эксплуатационных запасов подземных промышленных йодобромных вод по всем известным районам их распространения и составлена сводная карта прогнозных запасов для всей территории СССР в масштабе 1 : 4 000 000 (с врезками по перспективным районам в масштабах 1 : 200 000—1 : 2 500 000). Содержание гидрогеологических исследований при такой оценке определялось признаками и особенностями месторождений и предусматривало необходимость изучения таких факторов, как закономерности изменения химического состава подземных вод и содержания в них полезных компонентов (по площади артезианских бассейнов и в разрезе осадочных отложений); динамика подземных вод и пространственное изменение фильтрационных свойств водоносных пород; граничные условия месторождений, определяемые комплексом гидрогеологических факторов; геолого-экономические показатели разработки месторождений при их освоении.

В соответствии с рассматриваемым кругом задач были разработаны и применены на практике принципы и методы специализированного гидрогеологического картирования подземных промышленных вод, что также сыграло положительную роль при решении указанной проблемы. Здесь имеются в виду исследования общих региональных гидрогеологических закономерностей, изучение параметров водоносных комплексов на значительных территориях, оценка связи гидрогеохимии с особенностями динамики глубоких подземных вод пластовых водонапорных систем, анализ взаимосвязи водоносных горизонтов и выявление масштабов и роли межпластовых перетоков подземных вод в формировании их химического состава и месторождений гидроминерального сырья. Эти исследования позволили создать научную региональную гидрогеологическую основу для подсчета запасов подземных промышленных вод в пределах крупных геологических структур и для территории страны в целом [3].

Впервые были обоснованы критерии гидрогеолого-промышленной оценки месторождений, разработано содержание кондиционных требований к ним и методика обоснования этих требований. Технико-экономический анализ показал, что при оценке эффективности использования подземных промышленных вод в индустриальных масштабах определяющими являются не только и не столько концентрации полезных (извлекаемых) компонентов, сколько комплекс гидрогеологических условий (глубина залегания продуктивных водоносных горизонтов, глубина динамических уровней подземных вод, дебиты эксплуатационных скважин и водозаборов), а также размеры капиталовложений в сырьевую базу промышленных предприятий и эксплуатационные затраты на добычу подземных вод.

Выполненные исследования привели к существенному изменению понятия о кондиционных требованиях к месторождениям про-

мышленных вод; эти требования, установленные в полном объеме путем совместных гидрогеологических и технико-экономических расчетов, существенно различны для всех выявленных месторождений. Отметим, кстати, что основные научно-методические разработки в области региональной оценки месторождений промышленных йодобромных вод полностью применимы к оценке промышленного освоения подземных вод других типов — редкометальных (литиевых, цезиевых, рубидиевых, бороносных), а также термальных и пластовых минеральных.

В 1980 г. была составлена карта распространения подземных редкометальных вод СССР; для отдельных перспективных регионов выполнена прогнозная оценка потенциальных ресурсов этого вида минерального сырья, свидетельствующая о весьма высоких перспективах его практического освоения.

Геотермальные ресурсы связаны как с природными динамическими носителями тепловой энергии недр — геотермальными водами (вода, пар, пароводяные смеси), так и с практически безводными (водонепроницаемыми) нагретыми горными породами. Первый вид рассматриваемых ресурсов получил название гидрогеотермальных, второй — петрогеотермальных. Практическое использование колоссальных запасов тепла петрогеотермальных ресурсов связано с необходимостью решения ряда весьма сложных научно-технических проблем проектирования и создания в промышленных масштабах эффективных подземных искусственных систем извлечения тепла (циркуляционных систем, тепловых котлов). Поэтому на современном этапе развития техники и технологии извлечения геотермальных ресурсов масштабы их практического использования определяются в первую очередь размерами эксплуатационных запасов и теплоэнергетическим потенциалом термальных вод.

СССР обладает крупными геотермальными ресурсами, для которых установлены основные закономерности их распространения и формирования, завершена предварительная региональная оценка эксплуатационных ресурсов термальных вод, создана научная основа для разработки Генеральной схемы промышленного освоения гидрогеотермальных ресурсов. Издан Атлас карт эксплуатационных ресурсов термальных вод, включающий карту термальных вод СССР и гидрогеологические разрезы к ней, карту потенциальных ресурсов термальных вод СССР и серию гидрогеотермических карт ресурсов основных перспективных регионов. Оценка эксплуатационных ресурсов выполнена на основе анализа геологических, гидрогеологических и геотермических особенностей перспективных территорий, комплексного решения гидрогеологических, теплофизических, гидравлических и технико-экономических задач, включая вопросы экологии, рационального использования и охраны недр. Эксплуатационные ресурсы представляют собой геолого-экономически обоснованные величины отбора термальных вод и их теплоэнергетического потенциала для двух методов разработки месторождений (с поддержанием и без поддержания пластовых давлений — ППД) и двух способов эксплуатации скважин (фон-

танный и насосный). Они классифицированы по основным показателям качества, определяющим возможность их теплоэнергетического использования, сложность решения вопросов борьбы с коррозией и солеотложениями и последующего их сброса.

Оценки выполнены для Западно-Сибирской (апт-сеноманский и неокомский комплексы), Скифской (среднемиоценовый и меловые комплексы в Предкавказье), (дат-палеоценовый и нижнемеловой комплексы в Крыму) и Туранской (альб-сеноман-туронский и неоком-аптский комплексы) платформенных артезианских областей, а также для ряда межгорных артезианских бассейнов — Рионского, Куринского, Ташкентского, Северо-Сахалинского. Эксплуатационные ресурсы термальных вод перечисленных пластовых водонапорных систем с температурой 40—150 °С и минерализацией от 1 до 200 г/л составляют: при фонтанном способе эксплуатации скважин более 1,2 млн. м^3/сут, что по теплоэнергетическому потенциалу эквивалентно 76,4 млн. ГДж/год, при насосной эксплуатации — 37,8 млн. м^3/сут или 1776 млн. ГДж/год. Из этих ресурсов к числу первоочередных отнесены воды с температурой более 50 °С и минерализацией менее 10 г/л. Их ресурсы при традиционном методе извлечения (фонтанная эксплуатация) составляют 0,54 млн. м^3/сут, что эквивалентно 32,3 млн. ГДж/год.

Эксплуатационные ресурсы термальных вод и парогидротерм трещинных водонапорных систем Камчатки, Курильских островов и зоны Байкальского рифта составляют воды с температурой 40—100 °С и минерализацией до 3 г/л — 0,8 млн. м^3/сут (67,2 млн. ГДж/год), парогидротермы (с температурой более 150 °С) могут обеспечить работу ГеоТЭС суммарной мощностью 950—1000 МВт. Сопоставление приведенных данных показывает, что на эксплуатационные ресурсы термальных вод пластовых водонапорных систем приходится более 90 % от их общей величины.

Предварительная геолого-экономическая оценка показала, что разработка геотермальных месторождений пластовых систем без ППД при фонтанном способе эксплуатации скважин должна рассматриваться как экстенсивный метод, позволяющий извлечь ничтожную долю запасов термальных вод и тепла недр [50]. При этом способе, как правило, возможно создание лишь мелких водозаборов с незначительными производительностями (до 20—30 тыс. м^3/сут). Существенным недостатком является также ограниченность территорий, в пределах которых целесообразно применение этого метода. Это обычно площади с высокими значениями избыточных напоров вод и водопроводимости коллекторов. Насосный способ эксплуатации скважин, несмотря на имеющиеся технические сложности его реализации, обеспечивает существенное расширение перспектив теплоэнергетического использования термальных вод, а также возможность создания относительно крупных (до 200 тыс. м^3/сут) рациональных в технико-экономическом отношении водозаборов. При планировании промышленного освоения ресурсов термальных вод традиционными методами (без ППД) в большинстве случаев следует учитывать необходимость решения

вопросов безопасного для окружающей среды сброса термальных вод.

Увеличение количества разведанных запасов термальных вод и их использования требует усиления научно-исследовательских и поисково-разведочных работ. Одна из ключевых задач при этом заключается в переоценке эксплуатационных запасов подземных термальных вод в перспективных районах их распространения и на территории СССР в целом. Это даст возможность обосновать генеральную схему использования термальных вод с учетом перспектив вовлечения в освоение термальных рассолов, условий сброса отработанных вод и предотвращения влияния этого сброса на окружающую среду и состояние недр, а также с учетом возможности использования термальных вод в качестве гидроминерального сырья и в лечебных целях.

Вторая, не менее важная задача — обоснование рациональных методов разведки месторождений (в первую очередь трещинно-жильных) и оценки их эксплуатационных запасов, основанных на теоретических, модельных и экспериментальных исследованиях фильтрационных и тепловых процессов при эксплуатации глубокозалегающих горизонтов (последние характеризуются высокими пластовыми давлениями и температурами, а также фильтрационной и температурной неоднородностью). При этом необходимо учитывать физико-химическое взаимодействие вод и пород в естественных условиях и при разработке месторождений (в том числе с закачкой отработанных вод в глубокие горизонты, в частности, эксплуатируемые).

По результатам выполненных в этой области научно-теоретических и опытно-методических работ исследованы вопросы теплопереноса и фильтрации подземных вод переменной плотности и вязкости в пластовых гидротермальных системах; начато изучение геохимической специфики подземных вод глубоких горизонтов гидротермальных систем репрезентативных бассейнов; разработан геолого-экономический принцип оценки эксплуатационных запасов термальных вод, позволяющий определять оптимальные масштабы вовлечения этих вод в топливно-энергетический баланс страны.

Одновременно с развитием фундаментальных теоретических и научно-методических работ в традиционно сложившихся направлениях возникают новые задачи, связанные с организацией крупных комплексных гидрогеологических исследований по ключевым проблемам народного хозяйства.

Так, стремительный прогресс во всех сферах материального производства обусловливает интенсивную эксплуатацию природных ресурсов и оказывает существенное влияние на окружающую среду. Вопросы, связанные с процессами геотехногенеза и их влиянием на природу, способами и системами разработки месторождений полезных ископаемых, технологией комплексной переработки минерального сырья, экономическими критериями рационального использования недр и полезных ископаемых неизбежно воз-

никают при решении комплексных народнохозяйственных проблем.

Разработка научных основ прогнозирования изменения гидрогеологических условий верхней части земной коры с целью рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды весьма сложна. По своему содержанию проблема является комплексной и охватывает самые разнообразные отрасли знаний. Вместе с тем возникает необходимость проведения и специальных научных исследований по ее отдельным разделам, для которых гидрогеологическое обоснование является ведущим направлением.

Комплексные гидрогеологические исследования необходимы, как уже отмечалось, при решении задач, которые возникают в связи с созданием в стране территориально-производственных комплексов, расширением зоны орошаемого земледелия, освоением Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, сооружением крупных горнорудных предприятий, расширением городского строительства и т. д. Методологически подобные комплексные исследования, проводимые на крупных объектах, должны основываться на принципах системного анализа, который предусматривает определение понятия «система» (объект исследований) как множество взаимосвязанных элементов, образующих устойчивое единство и целостность и обладающих интегральными свойствами и закономерностями. Выделение такого множества элементов и установление закономерностей структуры, ее функционирования и развития является основной задачей системных исследований.

Как известно, в настоящее время отсутствует единый взгляд на условия формирования подземных вод глубоких горизонтов артезианских бассейнов. Имеется ряд гипотез, в основу которых поставлены тот или иной источник вод (ювенильная, седиментационная, инфильтрационная, дегидратационная) и насыщающих их солей; силы (гравитационная, трансляционная, диффузионная, осмотическая и др.) и процессы, приводящие к перераспределению составляющих подземные воды компонентов.

Очевидно, нет необходимости доказывать, что гипотезами учитываются реальные источники и процессы. Однако в большинстве случаев каждая концепция абсолютизируется исследователем, тогда как роль отдельных факторов формирования подземных вод не может быть признана однозначной для всего разнообразия гидрогеологических условий. Подземные воды, если понимать под ними геологическое тело, могут быть изучены как статическая, динамическая или ретроспективная системы, которые будут отличаться характером связей элементов, принципами и методами исследований. При этом следует иметь в виду, что подземные воды, рассолы и образуемые ими системы находятся под воздействием механических, физических, химических, биологических и антропогенных факторов. Поэтому системный подход к изучению условий формирования подземных вод даст возможность выявить наибо-

лее важные факторы и процессы для конкретных гидрогеологических условий изучаемого района.

Из изложенного следует, что в СССР выполняется большой объем гидрогеологических исследований, ставящих своей целью изучение закономерностей распространения и условий формирования различных типов подземных вод и их ресурсов, прогнозирование и геолого-экономическую оценку месторождений и их разведку, охрану окружающей природной среды (в частности, охрану подземных вод от истощения и загрязнения).

Дальнейшее развитие этих направлений будет способствовать не только развитию гидрогеологии как науки, но и решению ряда важных прикладных народнохозяйственных задач — увеличению использования пресных подземных вод на нужды питьевого водоснабжения, а в некоторых случаях и орошения; существенному увеличению промышленных, гидротермальных и гидроминеральных эксплуатационных ресурсов, что предопределит в свою очередь расширение их практического использования и позволит увеличить минерально-сырьевой и энергетический потенциал страны.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СССР И ЗА РУБЕЖОМ

Промышленные воды

В настоящее время природные минерализованные воды являются источником получения в промышленных масштабах натрия, кальция, калия, магния, хлора, брома, иода, бора, лития и ряда других элементов и химических соединений. Причем с каждым годом гидроминеральное сырье привлекает все более пристальное внимание как комплексный источник ценных элементов, потенциальные возможности которого полностью пока не раскрыты и не реализованы.

Ниже приводятся основные данные по ряду элементов, добыча которых осуществляется полностью или частично из природных минерализованных вод. Для оценки роли гидроминерального сырья в промышленном потенциале охарактеризованы ресурсы этого сырья, производство и потребление добываемых из него элементов и соединений, цены на продукцию, а также тенденции развития добычи и использования гидроминеральных ресурсов в развитых капиталистических и развивающихся странах. Следует отметить, что данные, характеризующие использование гидроминеральных сырьевых ресурсов, неравноценны и разрозненны. Это связано отчасти с тем, что добыча и использование гидроминерального сырья осуществляются многочисленными частными фирмами, а отчасти с тем, что некоторым видам добываемой продукции придается стратегическое значение и доступные для использования опубликованные данные по их добыче и потреблению весьма ограничены.

Тем не менее нашедшие отражение в работе материалы представляют интерес, так как дают общее представление о добыче редких и рассеянных элементов и минеральных солей из природных минерализованных вод и о имеющей место тенденции расширения использования таких вод в качестве комплексного гидроминерального сырья. Последнее связано с высокой экономической эффективностью добычи ценных элементов и полной конкурентноспособностью гидроминерального сырья по отношению к традиционным рудным полезным ископаемым.

При рассмотрении материала выделены две группы элементов и соединений: 1) освоенные промышленностью — калийные, натриевые и кальциевые соли, магний, бор, бром, литий, иод, аммиачные продукты; 2) слабоосвоенные и осваиваемые промышленностью — медь, цинк, свинец, уран, вольфрам, стронций, серебро, ртуть, германий, цезий, рубидий, тяжелая вода. И та, и другая группа элементов и соединений в той или иной мере обеспечена технологическими разработками.

Поваренная соль. Мировая добыча поваренной соли базируется на месторождениях каменной соли, рассолах соляных озер, подземных рассолах и морской воде; в 1981 г. она составила 118,7 млн. т. Сведения, характеризующие добычу соли в 1978—1981 гг. в некоторых странах, приводятся в табл. 1.

США является крупнейшим производителем поваренной соли в капиталистическом мире. В 1982 г. добычу соли в США осуществляли 48 компаний; 15 ведущих фирм добыли более 90 % поваренной соли. В 1982 г. по сравнению с 1981 г. добыча снизилась незначительно и составила 35,1 млн. т, однако стоимость продукции возросла при этом на 5 % — до 666 млн. долл. В 1979 г. 54 % соли получено из рассолов, 32 % — за счет месторождений каменной соли, 14 % — способом выварки (включая вакуумную) и 4 % — выпаркой на солнце. В 1976 г.: из 50,4 млн. т добытой соли 27,0 млн. т использовано для получения хлора и каустической со-

Таблица 1

Производство поваренной соли в некоторых капиталистических и развивающихся странах (в тыс. т)

Страны	1978 г.	1979 г.	1980 г.	1981 г.
Всего	123 700	130 981	120 591	118 752
В т. ч. США	38 891	41 543	366 607	35 834
ФРГ	12 519	12 701	12 973	13 154
Индия	1 814	4 536	7 262	7 258
Канада	5 988	6 672	7 029	7 076
Франция	6 532	6 877	7 103	7 076
Великобритания	8 074	7 348	6 586	6 623
Мексика	4 717	5 625	5 988	5 897
Италия	4 173	5 080	5 267	5 352
Австралия	4 808	4 536	5 315	5 262

Таблица 2

Производство калийных солей (в тыс. т). По Ф. И. Ковальскому

Страны	1950 г.	1955 г.	1960 г.	1965 г.	1970 г.	1975 г.	1980 г.
Канада	—	—	40	1297	3 200	5 500	7 200
ФРГ	1094	2020	2316	2400	2 300	2 200	2 700
США	1168	1875	2394	2849	2 500	2 300	2 400
Франция	1018	1352	1733	1879	1 800	1 900	1 900
Испания	178	354	264	388	500	500	700
Италия	1	2	100	210	200	200	1 500
Великобритания	—	—	—	—	—	800	800
Прочие страны	70	37	100	420	700	900	1 600
Всего	3529	5640	6947	9461	11 200	14 300	18 800

ды, 11,1 млн. т — на борьбу с обледенением, 2,6 млн. т — на пищевые нужды, 1,9 млн. т для сельскохозяйственных целей, 1,2 млн. т — для производства различных химикалий.

Калийные соли. По данным Горного бюро США на начало 1978 г., запасы калийных солей в развитых и развивающихся странах в пересчете на K_2O составили 11,3 млн. т; мировое производство этих солей в 1980 г. достигло 18,8 млн. т (табл. 2).

Добыча калийных солей производится преимущественно из твердого минерального сырья; тем не менее 5—10 % общего их количества добывается из подземных и поверхностных рассолов; расширение использования гидроминеральных ресурсов для этих целей осуществляется или планируется в Австралии, Иордании, Израиле, Тунисе, Великобритании и других странах.

Производство *кальцинированной соды* с 1940 по 1981 г. возросло в мире с 7 до 35 млн. т; в последние годы производство этой продукции осуществлялось на 75 предприятиях, расположенных в 34 странах. Из общей мировой добычи соды около 35 % приходится на природную соду, 90 % которой добывается в США. Для получения соды используются также рассолы (Мексика, КНР, Египет, Кения и др.). В настоящее время во всем мире большое внимание уделяется поиску природных месторождений соды (ископаемых содовых минералов и содовых вод), так как искусственное получение соды приводит к значительному загрязнению окружающей природной среды.

Мировая добыча *сульфата натрия* в 1978 г. составила 4,58 млн. т, в том числе (в млн. т): в США — 1,24; в Японии — 0,35; в Канаде — 0,42; в Испании — 0,34; в Бельгии — 0,28; в ФРГ — 0,23; во Франции — 0,14; в Швеции — 0,12. Добыча сульфата натрия из гидроминерального сырья составляет 20—30 % от общего его количества.

Мировое производство *хлорида кальция* ориентировочно оценивается в 2,5—2,7 млн. т/год. Производство хлорида кальция из гидроминерального сырья составляет около 20—25 % от общей его добычи. Первое место в мире по производству этой продукции занимает США, где в 1980 г. выработка его в пересчете на 100 % $CaCl_2$ составила 635 тыс. т.

Основной способ производства хлорида кальция — выпаривание сбросной дистиллярной жидкости аммиачно-содового производства с выделением из нее поваренной соли и дальнейшим концентрированием раствора $CaCl_2$. Второй способ — выделение хлорида кальция из природных рассолов (в США этим способом получают примерно 75 % производимого в стране продукта). Так, в США в течение нескольких десятилетий хлористый кальций извлекают из подземных рассолов оз. Бристоль, а на опытной электрогенерирующей установке в оз. Солтон-Си из геотермальных рассолов периодически получают 40 %-ный раствор хлористого кальция, выпаривая на солнце геотермальный рассол.

Магний. Мировое производство окиси магния в 1977 г. составило около 13 млн. т, в том числе из магнезита 10 млн. т и из морской воды и рассолов 3 млн. т. В последние годы наблюдается тенденция к росту производства окиси магния из морской воды и рассолов, что можно видеть в увеличении общей мощности соответствующих заводов, которая, по данным Б. И. Когана и В. А. Названовой, в 1968 г. во всем мире оценивалась в 1,18 млн. т, а в 1973 г. — 2,27 млн. т, в том числе (тыс. т): США 695, Япония 358, Великобритания 250, Италия 180, Норвегия 80, Ирландия 75, Израиль 50, Мексика 50, Канада 30.

Добыча магния из гидроминерального сырья составляет около 25 % от общей добычи. В качестве сырья используются морская вода, подземные и поверхностные рассолы.

Магний из морской воды был впервые получен в Великобритании в годы второй мировой войны. Затем аналогичное производство было организовано в США, Франции и в некоторых других странах. Добыча из морской воды и рассолов оказалась для некоторых стран выгоднее, чем из руд, и в настоящее время она составляет около пятой части всего мирового производства этого металла. Динамика роста производства магния из гидроминерального сырья приведена в табл. 3.

Производство окиси магния из жидкого сырья особенно развито в США, где сохранилось лишь одно предприятие по добыче магнезита в Габбсе (шт. Невада) с годовой производительностью 150 тыс. т. В остальном магнезию получают на 8 заводах из морской воды — 695 тыс. т, а также из озерных рассолов в шт. Юта — 235 тыс. т (3 завода) и из буровых рассолов — 510 тыс. т (в шт. Техас — 1 завод, в шт. Мичиган — 5 заводов). Суммарные ресурсы магния в рассолах не подсчитывались: только в Большом Соленом озере они определены в 630 млн. т (в виде хлорида магния). Большинство источников магнийсодержащих рассолов связано с толщами погребенных эвапоритов (например, в шт. Мичиган). Окись

Таблица 3

Производство MgO из морской воды и рассолов (в тыс. т)

Страны	1972 г.	1973 г.	1974 г.	1975 г.	1977 г.
Япония	548	707,6	670	628	713
США	500	524,3	1079	—	1005
Греция	170	195	250	330	550
Великобритания	250	—	—	208	250
Италия	170	—	—	—	217
Норвегия	—	—	108,8	—	200
Ирландия	—	68	—	—	75
Мексика	50	72,5	—	—	54
Израиль	—	—	—	40	50
Канада	30,0	27,2	—	—	—

магния применяется в металлургии, химической, бумажной, резиновой и других отраслях промышленности. Основными экспортерами окиси магния являются Греция, Италия, Австрия, Франция. Стоимость металла составляет 150—172 долл./т. Некоторые американские фирмы повысили цены на высшие сорта магния до 220 долл./т.

Бор. Запасы борного сырья в мире оцениваются 8950 млн. т. Мировая добыча (без СССР) соединений бора в 1979 г. составила 2911 тыс. т, в том числе в США добыто 1360 тыс. т, в Турции — 1179 тыс. т, Аргентине — 64 тыс. т, Чили, Перу и КНР — по 27 тыс. т в каждой стране.

Добыча бора осуществляется из гидротерм и подземных рассолов и составляет ориентировочно 20—30 %. США занимает ведущее положение в мире по добыче боратов и экспорту продукции в разные страны. Мировая добыча (без СССР) бора в 1980 г. (1981 г.) составила (в тыс. т. B_2O_3): всего 1066 (1038); в т. ч. США 710 (680), Турция 272 (272), Аргентина 27 (29), Перу 5 (5).

Положение с добычей, импортом и экспортом бора в США приведено в табл. 4.

Таблица 4

Добыча, импорт и экспорт США (в тыс. т)

Состояние	1977 г.	1978 г.	1979 г.	1980 г.	1981 г.
Добыча	667	706	725	710	680
Импорт	29	44	31	26	22
Экспорт	332	364	382	321	348
Видимое потребление	364	386	372	340	326

В США все месторождения боратов находятся в западных штатах — Калифорния, Невада и Орегон. Наибольший практический интерес представляет месторождение борного сырья в Калифорнии, в частности, боросодержащее образование высохшего озера Серлс (здесь добывают бор, калий, соду, глауберовую соль, литий, бром и ряд других элементов).

Следует отметить, что значительное количество боратов в мире добывается из природных минерализованных вод (США, Италия, Япония, Турция, Чили, Боливия, Аргентина). Так, например, запасы боратов месторождения Серлс (США) составляют около 50 млн. т, оз. Оуэнс (США) — 3 млн. т, в саларах Чили — 20 млн. т. Предприятие в Троне (Серлс) из 175 скважин откачивает около 38 $м^3$/мин соляного рассола для его комплексной переработки. В Италии с 1771 г. добыча боратов ведется из термальных вод Тосканы; их производство в настоящее время составляет около 35 тыс. т в год. При постоянном повышении спроса на соединения бора значение природных вод как источника борного сырья возрастает.

Бром. Мировое производство брома (без СССР) в 1981 г. составило 320,5 тыс. т. Динамика производства брома приведена в табл. 5. Извлечение брома началось в Калифорнии в 1926 г. Сейчас большая часть потребляемого брома (90—95 %) добывается из природных вод. Ведущим производителем брома в капиталистическом мире являются США, на долю которых приходится более половины производства брома. В 1982 г. в США насчитывалось 5 компаний, занимающихся производством брома. Основные виды бромного сырья и их характеристика приведены в табл. 6.

Использование брома: антидетонаторные добавки, антипирены, сельскохозяйственные химические вещества, дезинфицирующие средства, противопожарные средства, жидкости для буровых растворов и др.

Литий. Общие запасы лития в капиталистических и развивающихся странах оцениваются (по данным Горного Бюро США) на 1.1.1977 г. в 14,1 млн. т, из них 2,2 млн. т — достоверные (табл. 7).

По данным Б. И. Когана, общие запасы окиси лития в зару-

Таблица 5

Динамика производства брома (в тыс. т)

Страны	1972 г.	1974 г.	1978 г.	1980 г.	1981 г.
США	175,5	199,0	202,5	171,5	195,5
Франция	14,7	16,6	16	14,1	14,5
Израиль	14,0	18,0	45	—	—
Япония	10,9	12,1	11	—	—
Великобритания	4,1	4,4	25	27,2	28,1
ФРГ	2,8	5,0	3,9	4,0	4,0
Италия	2,7	5,0	0,6	—	—

Таблица 6

Виды сырья на бром

Страны	Объем производства, тыс. т	Виды сырья	Концентрация брома, г/л
Великобритания	25	Морская вода	0,06—0,07
Израиль	1,8	Рассолы Мертвого моря	6 (на глубине 400 м) 10 (после садки NaCl)
Испания	0,2	Конечные рассолы соляных промыслов	Нет. св.
Италия	0,5	Морская вода	0,06—0,07
США	139,3	Пластовые воды нефтяных районов	0,5—3
	59,7	Подземные рассолы	0,5—3
	0,88	Морская вода	0,065
Франция	~ 13,8	Щелока калийного производства	Нет. св.
	2,5	Морская вода	»
ФРГ	5	Маточные рассолы калийных промыслов	4,5
Япония	13,9	Морская вода	0,065
	0,5—0,55	Концентрированная морская вода	Нет. св.

Таблица 7

Распределение мировых запасов лития (без СССР)

Месторождения	Запасы, млн. т			Содержание лития, %
	достоверные	вероятные	прогнозные	
В рассолах				
Сильвер-Пик (США, шт. Невада)	0,04	—	0,077	0,02
Серле (США, шт. Калифорния)		0,0237		0,05
Атакама (Чили)	1,29	—	3,0	0,135
В рудах				
	0,917	0,681	8,105	0,6—1,4
Всего	2,247	0,705	11,182	—

бежных странах выражаются в 64—65 млн. т, но за вычетом мало и слабо изученных геологически и технологически месторождений реальными из них следует считать 25 млн. т (12 млн. т лития). Примерно 37 % из них приходится на гранитные пегматиты и 63 % — на континентальные минерализованные воды, включая рассолы и салары.

К гидроминеральным месторождениям лития Б. И. Коган относит межкристальную рапу оз. Серлс, подземные высокоминерализованные воды Сильвер-Пик, геотермальные рассолы оз. Солтон-Си, озерную воду Большого Соленого озера, салары в Чили, Боливии и Аргентине, морские термальные воды около Исландии, рапу Мертвого моря; прогнозные запасы лития превышают 14,5 млн. т (табл. 8).

Литий в Боливии обнаружен в 1976 г. в 5 соленых озерах Липесской Кордильеры, в пустыне Уюни, вблизи чилийской границы. Предполагается, что в Центральных Андах, в том числе на северо-западе Аргентины, могут находиться еще и другие литиеносные салары. Ресурсы лития, обнаруженные в Боливии, сопоставимы с общими прогнозными запасами лития в рассолах (~3,077 млн. т). Концентрация металла составляет 80—1500 мг/л.

По подсчетам американских экономистов, суммарные геологические запасы лития при существующем уровне спроса смогут

Таблица 8

Основные гидроминеральные месторождения лития и их запасы

Месторождения	Содержание лития, %	Запасы металла, млн. т			
		Промышленные		Возможные	Прогнозные
		достоверные	вероятные		
США					
Серлс (шт. Калифорния)	0,005	—	0,024	—	—
Сильвер-Пик (шт. Невада)	0,04	0,040	—	0,077	1
Солтон-Си (шт. Калифорния)	0,02	—	—	—	1
Большое Соленое озеро (шт. Юта)	0,006	—	—	—	0,5
Буровые нефтяные воды в районе г. Смаковер (шт. Арканзас, Техас)	0,07	—	—	—	10
Чили					
Атакама	0,135	1,3	—	3	
Израиль, Иордания	0,002	—	—	-	2
Мертвое море					
Итого		1,34	0,024	3,077	14,5

обеспечить деятельность промышленности США в течение 200 лет. В 1978 г. было добыто карбоната лития (тыс. т, в скобках для сравнения данные за 1977 г.) 55,1, в том числе в Северной Америке 25 (33), Западной Европе 9 (7), Японии 4,1 (3,4), Южной Америке 3 (2,9). Добыча лития из гидроминерального сырья составляет около 50 % и осуществляется из гидротерм, подземных и поверхностных рассолов, а также из сборных вод геоТЭС.

Основной производитель литиевой продукции — США. Компания «Фут Минерал» занимает ведущее место в добыче и производстве лития. Она владеет горнометаллургическими предприятиями в Северной Каролине и в Сильвер-Пик (шт. Невада), где литий получают из рассолов. Имеются у нее также предприятия в штатах Пенсильвания и Теннесси. Компания «Литиум корп. оф. Америка» владеет горнометаллургическим предприятием в Бессемер-Сити. Третья компания США — «Керр. Мак Джи корп.» (ранее «Американ поташ») извлекает карбонат лития из рапы оз. Серлс в г. Трона (шт. Калифорния). Выпуск продукции находится на уровне 450 т/год (в пересчете на карбонат лития). Дальнейшее увеличение выпуска литиевой продукции компанией не предвидится, в связи с тем что производство основной продукции (магний, натрий, калий) не будет увеличиваться [24].

Компания «Фут минерал» совместно с чилийской государственной компанией «КОРФО» намеревалась приступить к добыче литиевого сырья из соляных отложений Салор-де-Атакама в Чили. Ожидали, что к 1984 г. производство литиевых продуктов на базе этого месторождения составит 907 т в год. Б. И. Коган в 1983 г. отметил, что Израиль приступил к технологическим исследованиям по извлечению лития из рапы Мертвого моря, а Япония — к извлечению его из морской воды.

Мировое потребление лития (без СССР) в 1980 г. оценивалось в 24,6 тыс. т (в пересчете на Li_2CO_3), в том числе в Северной Америке 11567 т, в Западной Европе 5433 т, Японии 2495 т, Южной Америке 2268 т, в остальных странах 2948 т. Крупнейшие области применения лития — алюминиевая промышленность, где его используют в виде карбоната и фторида для увеличения производительности электролизеров и снижения расхода электроэнергии и себестоимости продукции.

Крупными экспортерами соединений лития являются ФРГ, США, Италия, импортерами — Япония, ФРГ, Франция, США. Потребление лития в США в 1981 г. составило 2631 т (в пересчете на металл). Прогноз потребления лития на 1985 и 2000 гг. составлен Горным Бюро США. Потребление лития на 2000 г. (в пересчете на металл), по данным Цветметинформации 1977 г., приведено в табл. 9.

Характерно, что в настоящее время 44 % всего алюминия в США производится с использованием лития (в странах Западной Европы 16—18 %, в Аргентине, Бразилии и Венесуэле 50 %).

Йод. Мировые запасы йода оцениваются в 2,6 млн. т (без СССР). Наибольшие ресурсы йода имеет Япония, открывшая йод-

Таблица 9

Потребление лития в США

Сфера потребления	Потребление	
	т	%
Производство		
Алюминия	5 625	43,0
Керамики и стекла	2 450	18,8
Смазывающих веществ	598	4,6
Установки для кондиционирования воздуха	635	4,9
Прочие	3 755	28,7
Итого	13 063	100

ные подземные воды во время второй мировой войны. Кроме того, ресурсами йода располагают Чили, США, КНР, Индонезия. Мировая добыча в 1978 г. составила 10,5 тыс. т, из них Япония 6,0, Чили 1,8, КНР 0,4 тыс. т. В 1980 г. производство йода составило около 11 тыс. т, в т. ч. в Японии 6,5 тыс. т. Предполагается, что в 1985 г. мировая добыча йода достигнет 16,0 тыс. т.

Добыча йода из гидроминерального сырья (подземных вод) составляет около 80—85 %. Основным производителем йода является Япония: на ее долю в 1979 г. пришлось 55 % мировой добычи. Добыча йода в этой стране постепенно растет, однако до сих пор еще не достигнут максимальный уровень, зарегистрированный в 1972 г.—7505 т. Все ресурсы йода в Японии связаны с пересыщенными природным газом подземными водами; 80 % добычи йода приходится на район Южной Канто, занимающий часть территории префектур Тиба, Токио и Канагава. Кроме того, значительные запасы связаны с рассолами газовых месторождений Ниигата и Накадзо (префектура Ниигата), Садовара (префектура Миядзаны, Юж. Кюсю), Юж. Окинава и Осамандэ. Извлекаемые запасы йода в Японии оцениваются в 10 млн. т.

По данным горного отдела Министерства внутренних дел США, в 1980 г. потребление йода в стране оставалось на уровне 1979 г. (3,9 тыс. т). За счет импорта покрывалось 72 % потребностей в этом продукте. Компании «Калабриэн интернэшнл» и «Доукомикл» решили построить крупные предприятия по производству йода годовой мощностью 0,5—1,0 тыс. т. В то же время, японские фирмы «Годоэ», «Инк» и «Юнайтед индастриз рисорсиз К°, Лтд» завершили строительство в шт. Оклахома опытной установки по извлечению йода из попутных рассолов нефтяных месторождений. До строительства этой установки из попутных вод нефтяных месторождений ежегодно добывалось около 908 т йода. В США в 1978 г. йод использован (в тыс. т): для катализа и изготовления

пищевых продуктов 0,78; в фармацевтической промышленности 0,45; для изготовления стабилизаторов 0,5; для производства туши и краски 0,6; для санитарных целей 0,26; в фотографии 0,13.

Геохимические и технологические предпосылки позволяют предполагать промышленную добычу из гидроминерального сырья цезия, рубидия, вольфрама, германия, стронция, урана, меди, цинка, свинца, серебра, ртути и целого ряда других ценных элементов и соединений. Поэтому во многих странах мира ведутся крупные научно-исследовательские и экспериментальные работы с целью получения из природных вод названных веществ.

Медь. Мировые запасы и ресурсы меди оцениваются соответственно в 494 и 1133 млн. т; США запасы—92, ресурсы—290 млн. т. Другие ведущие по запасам и ресурсам меди страны — Чили, Канада, Замбия, Перу, Заир. Ведущие типы месторождений меди: меднопорфировые (2/3 запасов и ресурсов), стратиформные в осадочных породах (1/4), медноколчеданные в вулканогенных породах, медно-никелевые в базитовых интрузивах, самородной меди.

Производство меди в капиталистических и развивающихся странах в 1981 г. составило 7079 тыс. т. Учитывая известные в настоящее время запасы металлов, годовую добычу и ее прирост, обеспеченность сырьем меди составляет 40 лет; по некоторым оценкам ~24 года. В связи с этим поставлен вопрос о поиске новых сырьевых источников меди. Потенциальным источником меди являются природные рассолы межконтинентальных рифтовых зон. Так, например, в донных котловинах и желобах, расположенных вдоль рифта в осевой части Красного моря, на глубинах до 2000 м обнаружено 18 локальных бассейнов минерализованных горячих рассолов в отложениях илов. Мощность донных отложений в котловинах колеблется от 10 до 30 м. Рассолы и донные илы обогащены Cu, Zn, Ag, Au, Fe, Mn, Pb, Cd, Ba, Hg.

Разработано и подписано соглашение между семью арабскими странами (Египет, Саудовская Аравия, Иордания, НРДИ и ЮАР, Судан и Сомали) об эксплуатации минеральных богатств Красного моря. Разработан проект добычи, транспортировки и обогащения илов и рассолов с получением концентрата, содержащего 32 % Zn, 5 % Cu и 0,074 % Ag. Общий экономический потенциал минеральных богатств моря оценивается в несколько млрд. долл.

Цинк. Мировые запасы цинка оцениваются в 240,4 млн. т, ресурсы 270 млн. т. В 1977 г. мировое производство цинка на рудниках составило 6,6 млн. т. Большая часть цинковых руд представлена сульфидными месторождениями. Основным минералом для получения цинка является сфалерит ZnS. Мировое потребление цинка в 1977 г. составило 5,69 млн. т. Цинк занимает четвертое место в мире по объему потребления после железа, алюминия, меди. Из этого количества 1/5 приходится на США, хотя добыча цинка здесь составляет только 4 % от мирового. К 2000 г. предполагается среднегодовой прирост в потреблении цинка, порядка 1,8 %. В целом к 2000 г. мировой спрос составит 6,9—10,5 млн. т.

В США добывается руда со средним содержанием цинка 4 %, что значительно ниже промышленных кондиций, существующих в настоящее время в большинстве других горнодобывающих стран (6—9 %).

Учитывая известные в настоящее время запасы цинка, годовую добычу и ее прирост, обеспеченность производства цинка сырьем составит 20—30 лет. Вероятнее всего, в будущем потребность в сырьевых ресурсах будет удовлетворяться путем открытия новых месторождений, повышения рентабельности эксплуатации разрабатываемых и др. Предполагается изыскивать новые типы месторождений цинка, в частности, природные рассолы межконтинентальных рифтовых зон. При характеристике гидроминерального сырья на медь уже отмечалось, что разработан проект добычи, транспортировки и обогащения илов и рассолов Красного моря с получением концентрата, содержащего 32 % цинка, 5 % меди и 0,074 % серебра. Предпринимаются попытки извлечения цинка из отработанных геотермальных рассолов месторождения Солтон-Си (южная часть Калифорнии, США). Тепловая энергия рассолов с температурой 93,5—99,2 °С, минерализацией 200—250 г/л трансформируется в электроэнергию (100 МВт), после чего из них на опытных установках извлекается цинк, железо, магний и свинец, содержащиеся в концентрациях соответственно 190, 680, 270 и 50 мг/л.

Свинец. Мировые запасы свинца оцениваются в 169,1 млн. т, ресурсы в 330 млн. т. В 1977 г. мировое производство свинца на рудниках составило 3,59 млн. т. Большая часть свинцовых руд представлена сульфидными месторождениями. Основным минералом для получения свинца является галенит PbS. Мировое потребление свинца в 1977 г. составило 4,4 млн. т. Учитывая известные в настоящее время запасы свинца, годовую добычу и ее прирост, обеспеченность сырьем составит 30—40 лет. Поэтому уже сейчас предполагается изыскать новые типы месторождений свинца. К последним можно отнести природные рассолы межконтинентальных рифтовых зон. Так, например, рассолы Солтон-Си, вскрытые в терригенных породах на глубине около 1560 м, имеют хлоридный состав, минерализацию 330 г/л, pH 5,2 и содержат, по Д. Уайту, (в мг/кг): меди 6—8, цинка 540—600 и свинца 85—100. Имеются сведения о технологических проработках (в пяти вариантах) по извлечению свинца, цинка, магния и железа из отработанных геотермальных рассолов. Эти рассолы имеют минерализацию 200—250 г/л, концентрация свинца достигает 50 мг/л.

Уран. Общие (достоверные и расчетные дополнительные) запасы урана в капиталистических странах в 1979—1980 гг. составили 3,4 млн. т, в том числе достоверные запасы 1,8 млн. т. Из них по странам (тыс. т): США 496, Австралия 299, ЮАР 247, Канада 215, Нигер 160, Бразилия 74, Франция 40, прочие 293. Добыча урана в капиталистических странах в 1979 г. составила 38,5 тыс. т (США 14,4; Канада 6,8; ЮАР 4,8; Намибия 3,8; Нигер 3,6; Франция 2,4).

Общее количество урана в Мировом океане составляет $5 \cdot 10^9$ т (из расчета содержания урана в морской воде 3,3 мг в 1 $м^3$). В настоящее время наибольшую активность в изыскании промышленных способов извлечения урана из морской воды проявляют Япония, ФРГ и США. Учитывая малые концентрации урана в морской воде, для получения 100 т урана в год необходимо ежегодно перерабатывать до 200 млн. $м^3$ морской воды.

Вольфрам. Мировые запасы WO_3 в 1980 г. оценивались в 1469 тыс. т. Добыча WO_3 из твердого сырья в 1977 г. составила около 25 тыс. т и осуществляется преимущественно в Австралии, США, Южной Корее, Таиланде, Боливии. Однако имеются предпосылки для добычи вольфрама и из подземных рассолов. Так, в США в рапе оз. Серлс содержится до 55 мг/кг вольфрама. Его запасы оцениваются в 77 тыс. т. В настоящее время отработана технология получения железовольфрамового концентрата (WO_3 45—55 %) из рассолов этого месторождения.

Стронций. В настоящее время широко ведутся исследования по разработке промышленной технологии извлечения стронция из подземных рассолов. В подземных рассолах сосредоточено до 24 % мировых запасов стронция. Согласно данным Горного отдела Министерства внутренних дел США, ресурсы минералов стронция в стране оцениваются в 3,2 млн. т руды, содержащей около 85 % сульфата стронция.

Добыча стронциевого сырья в промышленно развитых капиталистических и развивающихся странах по годам приведена ниже (в тыс. т по содержанию металла).

Годы	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1979	1980	1981	1982
Добыча	47,0	37,7	37,2	44,0	32,1	24,6	50,8	51,7	32,7	24,5

Серебро. Общие запасы серебра в развитых капиталистических и развивающихся странах, по данным Горного Бюро США, составили в 1976—1978 гг. около 127,5 тыс. т. Почти 90 % запасов (около 114,4 тыс. т) серебра приходится на США, Канаду и Мексику, составляя соответственно 47,2; 26 и 19 тыс. т; остальные запасы сосредоточены в Австралии, Чили, Японии, Боливии, Перу и других странах.

Основными серебродобывающими странами являются Канада, Мексика, Перу, США, Австралия. Добыча серебра в капиталистических и развивающихся странах (т/год) приведена в табл. 10.

Относительно других основных видов полезных ископаемых обеспеченность добычи серебра минерально-сырьевыми ресурсами довольно низка. С учетом выявленных запасов годовой добычи и прироста добычи она составит 15—20 лет. В связи с этим возникает необходимость выявления дополнительных источников для получения серебра.

Обращается внимание на высокие содержания этого элемента в термальных водах. Так, Д. Е. Уайт и Г. А. Уоринг отмечают, что в фумаролах Шова-Шинзан (Япония) обнаруживаются высокие содержания цинка, мышьяка, олова и серебра. В Новой Зелан-

Таблица 10

Добыча серебра в некоторых зарубежных странах

Страны	1975 г.	1976 г.	1977 г.	1978 г.
Канада	1234,6	1281,4	1313,4	1206,0
Мексика	1167,8	1226,1	1462,1	1668,4
Перу	1117,5	931,2	936,2	1213,0
США	1086,7	1067,2	1187,1	1199,7
Австралия	726,2	778,7	848,4	773,2

дии из некоторых парогидротермальных источников и скважин отлагается золото-серебряная руда. В 1969 г. Горный департамент Новой Зеландии рассматривал вопрос о разведке геотермального поля Броудленд площадью более 20 км^2 в районах Роторуа в связи с тем, что на стенках буровых труб в двух паровых скважинах была обнаружена серебряно-свинцовая руда. Иностранные компании, занимающиеся разведкой на серу в этом районе, сразу же проявили интерес к новому открытию. Некоторые из них обратились за разрешением на разведку. Руда в виде сульфидов золота, меди и серебра установлена на глубине 730 м при температуре 270 °С.

Ртуть. Разведанные мировые запасы ртути определяются в 135, оценочные — в 580 тыс. т. Запасы ртути в США оцениваются в 12 тыс. т, а вместе с прогнозными ресурсами 28 тыс. т. Большая часть месторождений ртути представлена киноварными рудами. Мировое производство (без СССР) ртути за 1969—1979 гг. достигло максимума в 1971 г. — 10,4 тыс. т, минимума в 1978 г. — 6,3 тыс. т. Имеются сведения о попутной добыче ртути из нефтяных вод одного из месторождений в Калифорнии. В ряде мест при выходе подземных вод на поверхность наблюдается выпадение ртути.

Германий. Мировые ресурсы германиевого сырья (без СССР) оценивают в 8,6 тыс. т, в том числе запасы США — 3,9, Канады — 0,9, Европы — 1,4, Африки — 2,3. Производство германия в 1978 г. (прогнозные мощности на 1985 г.) составило (в т): США—19 (60), Бельгия—20 (60), Франция и Италия—27 (45), ФРГ—7 (40), Япония—17 (45).

В США в 1979 г. производство германия составило 23 т, потребление 24 т. На 1990 г. и 2000 г. прогнозируется потребление до 45 и 55 т/год, что соответствует ежегодному приросту добычи 5,8 % для текущего десятилетия и 4 % — для следующего. Прирост будет определяться расширением использования германия в инфракрасной технике, а также в производстве полупроводников и оптических волокон.

Добыча германия осуществляется преимущественно из твердого сырья, однако имеются сведения о добыче германия из минерализованных вод в Японии и о многочисленных технологических разработках в этом направлении.

Таблица 11

Оценка потребностей в цезии

Потребность	Диапазон прогноза на 2000 г.		Наиболее вероятный уровень	
	Низший предел	Высший предел	1990 г.	2000 г.
Мировая (без СССР)	20,9	748,4	77,6	256,3
США	11,8	521,6	42,2	154,3
В том числе:				
химическая промышленность	1,4	22,7		9,1
электроэнергетика	3,6	453,6		136,1
прочие отрасли	6,8	45,3		9,1

Цезий. Геологические запасы и ресурсы цезия в капиталистических странах, по данным Цветметинформации 1978 г., оцениваются в 100 тыс. т, в том числе в Канаде 64, Зимбабве 27, Намибии 9. Твердое сырье добывается преимущественно в Намибии и Зимбабве. По данным Н. А. Солодова, в небольших количествах добыча цезия и рубидия из минерализованных вод осуществляется в КНР, Японии, Новой Зеландии и Италии. В США цезий не добывается и потребность в нем удовлетворяется импортом; в 1979 г. было ввезено 7620 кг цезия.

Прогнозная оценка мировых потребностей в цезии, по данным Горного Бюро США (в т при пересчете на металл), указана в табл. 11.

Рубидий. Геологические запасы рубидия, который не имеет собственных минералов, не определялись. По оценке Н. А. Солодова, запасы рубидия Rb_2O в твердом сырье могут составлять ~170 тыс. т, причем 40 % мировых запасов приходится на запасы в минерализованных водах. В незначительных масштабах добыча цезия и рубидия ведется в КНР, Японии, Новой Зеландии, Италии. Потребление рубидия определяется несколькими сотнями килограммов, в США в 1979 г. она составила ~1034 кг.

В настоящее время гидроминеральное сырье привлекает внимание не только как источник получения названных выше элементов и соединений, но и как источник добычи железа, фтора, мышьяка, золота, серы. Однако сведения о возможности их извлечения из минерализованных вод носят противоречивый характер. В институтах и исследовательских центрах многих стран продолжаются поисковые технологические работы по извлечению ценных элементов из минерализованных растворов. Предполагаются как новые способы извлечения элементов, добыча которых осуществляется в промышленных масштабах, так и разработка способов извлечения тех элементов, которые можно будет получать из гидроминерального сырья.

Таблица 12

Добыча элементов и соединений из гидроминерального сырья

Элементы или их соединения	Общая добыча, тыс. т	Добыча из гидроминерального сырья (ориентировочно), %
Элементы и соединения в промышленных масштабах		
Поваренная соль	$1{,}2 \cdot 10^5$	30—35
Калийные соли	$2{,}2 \cdot 10^4$	5—10
Сода	$3{,}5 \cdot 10^4$	5—10
Магний (MgO)	$1{,}3 \cdot 10^4$	25
Сульфат натрия	$4{,}6 \cdot 10^3$	20—30
Хлорид кальция	$2{,}7 \cdot 10^3$	20—25
Бор (B_2O)	$1{,}0 \cdot 10^3$	20—30
Бром	$3{,}2 \cdot 10^2$	90—95
Литий	55	50
Йод	11	80—85
Аммиачные продукты	—	<1
Элементы и соединения с осваиваемой добычей		
Железо*	$n \cdot 10^5$	—
Медь**	$7{,}1 \cdot 10^3$	—
Цинк**	$6{,}6 \cdot 10^3$	—
Свинец*	$3{,}6 \cdot 10^3$	—
Уран**	38,5	—
Вольфрам**	25	—
Стронций**	24,5	—
Серебро*	8,0	—
Ртуть**	6—10	<1
Германий	$2{,}3 \cdot 10^{-2}$	<1 (?)
Цезий*	$7{,}7 \cdot 10^{-3}$	—
Рубидий*	$2 \cdot 10^{-3}$	—
Тяжелая вода*	—	—

* Имеются технологические испытания сырья.
** Разработаны проекты добычи.

В капиталистических и развивающихся странах для промышленной добычи многочисленной продукции широко используется гидроминеральное сырье. Масштабы добычи такой продукции приводятся в табл. 12.

К числу наиболее распространенных типов гидроминерального сырья относятся: 1) термальные рассолы межконтинентальных рифтовых зон; 2) термальные воды и рассолы островных дуг и областей альпийской складчатости; 3) воды и рассолы артезианских бассейнов; 4) рассолы современных эвапоритовых бассейнов; 5) морские воды.

В качестве самостоятельной разновидности следует рассматривать попутные и сточные воды, которые в первичном состоянии могут относиться к одной из пяти названных выше разновидностей.

1. *Гидротермы межконтинентальных рифтовых зон.* Термальные рассолы рифтовых зон (Калифорнийский залив, Красное море) рассматриваются как потенциальный сырьевой источник хлорида кальция, поваренной соли, брома, меди, цинка, свинца, железа, серебра и других ценных элементов. Остановимся кратко на общей характеристике этой разновидности сырья.

Рифты Калифорнийского залива и Красного моря, по Е. Е. Милановскому, относятся к типу межконтинентальных рифтовых зон, в которых осевая часть сложена океанической корой, а обрамление — континентальной. Они подразделяются на эпиплатформенные (с платформенной рамой — Красное море, Аденский залив) и эпиорогенные (с рамой молодых складчатых сооружений — Калифорнийский залив). Тип обрамления рифтов влияет на состав водовмещающих толщ и связанных с ними термальных вод и рассолов.

Термальные рассолы Красного моря связаны с эпиплатформенным рифтом. Рифт Красного моря через Эфиопский рифт соединяется с Африканскими рифтовыми долинами. Осевая котловина Красного моря может считаться аналогом центральной части срединно-океанического хребта. В нескольких впадинах (Суанин, Нереус, Атлантис II, Дискавери и Чейн) центрального трога Красного моря придонная вода отличается крайне высокой минерализацией (до 257 г/кг) и повышенной температурой. Наиболее хорошо изучены впадины Атлантис II и Дискавери. Состав рассолов этих впадин приведен в табл. 13. Термальные рассолы в сопоставлении с морской водой обогащены хлоридом натрия и имеют высокое отношение кальция к хлору. Они характеризуются относительно высокими содержаниями калия, железа, марганца, цинка и других элементов. Содержания магния и сульфата более низкие.

Представления о формировании рассолов Красного моря разноречивы. Однако все их можно подразделить на четыре основные группы: концентрирование вод Красного моря; выщелачивание пород подземными водами; поступление ювенильных вод; концентрирование вод различного генезиса [22].

Калифорнийский рифт лежит на северном продолжении осевой зоны Восточно-Тихоокеанского поднятия. Продолжение Восточно-Тихоокеанского рифтового пояса переходит через Калифорнийский залив на Северо-Американский континент, где «накладывается» на кордильерскую мезозойскую складчатую зону и выклинивается в районе оз. Солтон-Си.

Между Калифорнийским заливом и оз. Солтон-Си простирание рифтовой зоны отвечает структурной депрессии Солтон-Трог, заполненной позднекайнозойскими дельтовыми отложениями р. Колорадо. К этой подземной части рифта приурочено несколько высокотемпературных гидротермальных систем (в том числе Серро-Прието и Солтон-Си), трассирующихся проявлениями четвертичного вулканизма и выходами горячих источников и парогазовых струй с исключительно высокими температурами (360 °С) и по-

Таблица 13

Состав термальных рассолов и вод впадин Красного моря, г/кг

Компоненты и показатель	Атлантис II		Дискавери		Вода океана
	1	2	1	2	
Na^+	92,60	113,25	93,05	108,85	10,75
K^+	1,87	2,69	2,14	2,74	0,39
Ca^{2+}	5,15	5,81	5,12	3,97	0,41
Mg^{2+}	0,76	0,9	0,81	1,48	1,29
MH_4	—	0,016	—	0,058	—
Cl^-	156,03	190,06	155,3	180,85	19,35
Br^-	0,13	—	0,12	—	0,066
SO_4^{2-}	0,84	0,82	0,7	0,48	2,71
HCO_3^-	0,14	—	0,03	—	0,72
Si	0,03	0,0004	0,003	0,0002	$4 \cdot 10^{-3}$
Fe	0,08	0,018	0,003	0,0066	$2 \cdot 10^{-5}$
Mn	0,08	0,11	0,05	0,042	$1 \cdot 10^{-5}$
Zn	0,005	0,0025	0,0008	0,0105	$5 \cdot 10^{-6}$
Cu	0,0003	0,00066	0,0001	0,0099	$1 \cdot 10^{-5}$
Co	0,0002	0,0015	0,0001	—	—
Pb	0,0006	0,003	0,0002	0,00048	$4 \cdot 10^{-6}$
Ni	—	0,0015	0,0003	—	$1 \cdot 10^{-7}$
M, г/л	257,76	307,6	257,37	291,8	35,71
T, °C	56,5	—	44,7	—	—
γ	1,178	—	1,183	—	1,03
pH	5	5,8	—	6,4	—

1 — термальный рассол, 2 — иловая вода.

вышенной минерализацией вод (табл. 14). На гидротермальном месторождении Серро-Прието успешно действует геоТЭС, мощность которой составляет 150 МВт.

Общая производительность 30 скважин составляла 3540 т/ч воды и 1500 т/ч пара. Из высокоминерализованных флюидов в скважинах и трубопроводах интенсивно высаживался кремнезем, вследствие чего за 50 сут гидравлические сопротивления возросли на 90 %.

Имеется также геоТЭС на гидротермальном месторождении Солтон-Си. По расчетам Г. Хельгесона, глубокая скважина может продуцировать в день около 10 000 м³ флюида. При этом на дневную поверхность может ежедневно выноситься свыше 2700 тыс. т солей. В связи с предполагаемым увеличением мощности геоТЭС и, естественно, количества добываемой жидкости обостряется проблема утилизации солей и извлечения ценных компонентов из сбросных вод. Необходимо отметить, что здесь уже периодически добываются соли $CaCl_2$. В настоящее время проводятся работы по извлечению из рассолов цинка, железа, магния и свинца.

2. *Термальные воды и рассолы островных дуг и областей альпийской складчатости.* В настоящее время термальные воды островных дуг и областей альпийской складчатости используются для

Таблица 14

Химический состав термальных флюидов гидротермальных систем Калифорнийской рифтовой зоны, мг/л

Компоненты и показатель	Сьеро-Прието	Солтон-Си	Компоненты и показатель	Сьеро-Прието	Солтон-Си
HCO_3	1 653	150	Mn	—	1 400
CO_3	—	—	Sr	—	400
SO_4	0,0	—	Ba	—	325
Cl	10 420	155 000	Zn	—	540
J	3,1	18	Rb	—	102
F	—	15	H_2S	12	16
Br	14,1	120	H_2BO_3	70,9	2 232
NH_4	—	409	H_2SiO_3	961,3	540
Na	5 820	50 400	Al	—	4,2
K	1 570	17 500	As	—	12
Li	19	215	Cu	—	8
Rb	—	135	Ag	—	1
Cs	—	14	M, г/л	197,70	258
Ca	280	28 000	pH	5,7	5,2
Ma	8	54	*T*, °C	340	300
Fe	0,2	2 290			

добычи бора и аммиачных продуктов (например, в Италии, на месторождении Лардарелло).

Продуктивный комплекс на этом месторождении представлен хорошо проницаемыми известняками и ангидритами с весьма изменчивой мощностью. В отдельных местах мощность толщи достигает нескольких сотен метров, а иногда эти породы полностью выпадают из разреза. Подстилается комплекс кристаллическими породами с трещинами северо-западного и северо-восточного направлений.

В районе месторождения пробурено около 500 скважин глубиной в среднем 620 м. Температура, получаемая из разных скважин на разбуренной площади, равна 220—230 °С. Общая производительность водозабора достигает 3 тыс. т/ч. Содержание борной кислоты в водах боросодержащих источников в провинции Тоскана колеблется от 0,1 до 0,7 %.

В практическом отношении интересны гидротермы Исландии, Японии и Новой Зеландии. Их характеристика достаточно подробно изложена в работе [22].

3. *Воды и рассолы артезианских бассейнов.* Подземные воды и рассолы артезианских бассейнов используются для добычи поваренной соли, солей калия и кальция, а также магния, брома и йода. Ведутся технологические разработки по извлечению из них лития, цезия, стронция и бора.

Наиболее интересными примерами этой разновидности гидроминерального сырья могут служить подземные рассолы штатов Мичиган и Оклахома (США) и воды профектуры Канто и Ниагата и п-ова Чиба (Япония), химический состав которых приведен в табл. 15.

Таблица 15

Химический состав подземных вод и рассолов некоторых продуктивных водоносных комплексов

Местоположение	Сумма солей, г/л	Содержание, мг/л								
		Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^{2-}	Br^-	I^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
США										
Бей-Сити, Мичиган	579,3	361 750	0,1	579,3	3400	5	4 077	21 785	177 700	8440
Давенпорт, Оклахома	194,7	119 855	132	122	Нет св.	Нет св.	62 724		9 977	1926
Оклахома-Сити, Оклахома	298,5	184 387	268	18	»	»	91 603		18 753	3468
Гарбер, Оклахома	224,9	139 496	353	43	»	»	60 733		21 453	2791
Япония										
Отаки (преф. Канто)	27,8	16 200	—	832	132	81	10 000		170	325
Хосокуса (преф. Канто)	29,2	17 300	—	1144	61,1	99,7	9 800	305	351	500
Фурусава (преф. Канто)	33,4	19 100	—	1490	70	126	11 690		169	464
Ябасе (преф. Акита)	25,6	14 139	—	3600	55	80	9 742	531	106	84
Койя (преф. Акита)	26,9	16 099	—	891	47	35	10 136	204	91	85
Кита-Ага (преф. Никагата)	35,3	20 590	—	925	136	71,4	11 840	600	683	265

Продуктивные водоносные комплексы Мичиганского бассейна сложены разновозрастными (от ордовика до плейстоцена) карбонатными, терригенными и эвапоритовыми отложениями. Водоносные породы шт. Оклахома представлены карбонатными (известняки, доломиты), реже терригенными (песчаники) образованиями от кембрия до перми. Глубина залегания комплексов до 4000 м и более. Хлоридные рассолы с минерализацией до 600 г/л используются для извлечения хлорида кальция, магния, брома и йода.

На территории Японии выделяются системы артезианских бассейнов, внешние области питания которых находятся в зоне активного водообмена. Внутренние области питания и накопления подземных вод бассейнов представлены небольшими впадинами, выполненными палеоген-неогеновыми и четвертичными образованиями. Крупнейшее в мире месторождение йода Юж. Канто связано с подземными водами в отложениях средне-позднеплиоценовой группы Кадзуса, занимающей площадь 12 тыс. км² и имеющей мощность 2800 м (песчано-глинистые отложения). Для отложений Кадзуса характерна чрезвычайно резкая латеральная изменчивость. Максимальные концентрации йода достигают 160 мг/л.

4. *Рассолы современных эвапоритовых бассейнов.* Эти рассолы принято подразделять на карбонатный, хлоридный и сульфатный типы, по М. Г. Валяшко. Рассолы карбонатного типа эвапоритовых бассейнов используются для извлечения соды, поваренной соли, солей калия, фосфатов лития, брома, бора; в перспективе предполагается добыча вольфрама. Бассейны с рассолами карбонатного типа известны в США (оз. Серлс, Большое Борное озеро), КНР (Цайдамская впадина), Турции, Иране, Афганистане, Индии, Мексике, Чили и др.

Наиболее интересным месторождением рассолов карбонатного типа является высохшее соляное оз. Серлс в шт. Калифорния (США). Оно расположено у северо-восточной окраины пустыни Моджэйв и представляет собой плоскую поверхность безводной долины, периодически покрывающейся паводковыми водами глубиной до 0,3 м. В центральной части котловины обнаружена соляная залежь площадью до 80 км², из которых 30 км² прослеживается с поверхности. Мощность залежи более 40 м. Соляная залежь обладает высокой пористостью (до 50 %) и насыщена межкристальной рапой, характеризующейся карбонатным составом и высокими содержаниями лития, вольфрама, сурьмы, мышьяка, фосфора, бора, аммония, калия и других ценных элементов.

Переработка рапы осуществляется на заводе в г. Трона, где производят соду, сульфат натрия, хлорид калия, сульфат калия, жидкий бром и бромиды, очищенную буру, борную кислоту, пироборат натрия, фосфатную кислоту, карбонат, фосфат и сульфат лития. В сутки перерабатывается 13,5 тыс. м³ межкристальной рапы, откачиваемой из продуктивных горизонтов озера.

Примером современных озер с рассолами карбонатного типа являются также озера Магади, Натрон и Катвэ в Восточной Аф-

рике, приуроченные к рифтовой зоне. Здесь в значительных масштабах осуществляется добыча соды. Распространение рассолов хлоридного типа современных эвапоритовых бассейнов ограничено и обычно они приурочены к областям молодой вулканической деятельности, характеризующимся засушливым климатом и наличием бессточных впадин. Хлоридный тип рассолов является источником добычи поваренной соли, хлористого кальция, калия и лития; возможно извлечение стронция и рубидия. Типичным представителем бассейнов хлоридного типа являются рассолы оз. Сильвер-Пик, оз. Бристоль (США), салары Чили, Аргентины, Боливии и др.

Оз. Сильвер-Пик расположено в шт. Невада в бессточной долине Клайтон. Долина площадью 1,5 тыс. км^2 выполнена рыхлыми терригенными отложениями мощностью 220 м, вмещающими рапу хлоридного типа с минерализацией до 200 г/л и содержанием лития 0,04 %. С помощью солнечной испарительной системы, по данным Б. И. Когана и В. А. Названова, концентрация лития в рапе повышается от 0,04 до 0,5 %. Запасы лития в оз. Сильвер-Пик неоднократно переоценивались в пределах от 10 до 1 млн. т (в пересчете на Li_2O). В Чили салар Атакама (сухое озеро-солончак) занимает площадь около 3000 км^2. Рапа, пропитывающая озерные отложения, содержит до 0,2 % хлорида лития. Это одно из крупнейших месторождений лития Южной Америки (около 0,85 млн. т Li_2O).

Сульфатный тип рассолов используется в качестве источника поваренной соли, сульфата натрия и калия, хлорида калия и магния, брома. Предполагается добыча лития и рубидия. Генетически такие рассолы связаны с испарением морской воды в озерах или заливах, частично или полностью отшнурованных от моря. В дополнительном питании озер участвуют подземные воды глубоких горизонтов или бокового грунтового стока. К этому типу относятся рассолы заливов и лагун внутриконтинентальных озер (Большое Соленое озеро). Морские воды в процессе солнечного концентрирования значительно обогащаются солями и ценными компонентами и становятся объектом переработки во многих странах (более 50 стран извлекают поваренную соль).

По данным Б. И. Когана и В. А. Названова, рассолы Большого Соленого озера, имеющего площадь примерно 2,5 тыс. км^2, глубину до 8—15 м, содержат 3,2 млрд. т поваренной соли, 450—540 млн. т Na_2SO_4, 108—180 млн. т солей калия, 4 млн. т LiCl. Из рассолов добываются поваренная соль, соли калия, магний, бром. Разрабатываются способы добычи лития и рубидия.

5. *Морские воды.* Из морской воды в промышленных масштабах извлекаются четыре элемента: натрий, хлор, магний и бром. При получении хлорида натрия и соединений магния попутно добывают соли кальция и калия. Запатентовано также немало способов извлечения из морской воды йода, калия, золота и серебра. Имеются проекты добычи урана и лития. По данным К. Руффо, Мировой океан, содержащий около 270 000 млрд. т D_2O, является

Таблица 16

Концентрации и массовое содержание некоторых элементов в морской воде.
По Дж. Меро

Элемент	Концентрация, мг/л	Общее количество в Мировом океане, 10^{10} т	Элемент	Концентрация, мг/л	Общее количество в Мировом океане, 10^{10} т
Cl	19 000,0	2 930 000	J	0,06	9,3
Na	10 500,0	1 630 000	Cu	0,003	0,5
Mg	1 350,0	210 000	U	0,003	0,5
S	885,0	140 000	Cs	0,0005	0,08
Ca	400,0	60 000	Ag	0,0003	0,05
K	380,0	60 000	W	0,0001	0,015
Sr	8,0	1 200	Ge	0,00007	0,011
B	4,6	710	Zn	0,00003	0,0046
Li	0,17	26	Au	0,000004	0,0006
Rb	0,12	19			

весьма перспективным источником для производства тяжелой воды.

В морских водах обнаружена большая часть химических элементов периодической системы Д. И. Менделеева. В океане на долю девяти наиболее распространенных элементов приходится 99 % всего количества растворенных веществ. По М. Г. Валяшко, морская вода относится к сульфатному типу. Содержания в морской воде некоторых химических элементов приведены в табл. 16.

Учитывая незначительные абсолютные концентрации элементов, в большинстве случаев морские воды требуют дополнительного концентрирования. Как правило, для производства соли выпариванием из морской воды необходим жаркий сухой климат с ветрами. Описанные разновидности гидроминерального сырья в обобщенном виде приведены в табл. 17.

Теплоэнергетические воды

Перспективные районы развития значительных запасов термальных вод связаны с современными гидрогеотермальными системами, приуроченными в основном к районам молодого и современного вулканизма, крупных разломов земной коры и альпийского горообразования, а также к более древним горноскладчатым сооружениям, испытавшим активное воздействие неотектонических движений. Естественно, что и наиболее интенсивное освоение геотермальных ресурсов, особенно для целей выработки электроэнергии, шло в странах, расположенных в перечисленных районах. При этом весьма показательна динамика роста мощностей геотермальных электростанций: в 1961 г. геоТЭС имели всего три страны (Италия, Новая Зеландия, США), а их общая мощность составляла 535 МВт; по состоянию на 1979 г. количество зарубежных стран, имеющих геоТЭС, возросло, а общая мощность стан-

Таблица 17

Основные виды гидроминерального сырья капиталистических и развивающихся стран

Подтип	Класс	Подкласс	Тип вод, по М. Г. Валяшко	Ценные элементы	Местонахождение
Природные	Подземные	Гидротермы межконтинентальных рифтовых зон	Хлоридный	$CaCl_2$, CO_2, (NaCl, Zn, Cu, Pb, Fe, Ag, Li, Br)	Атлантис II (Красное море), оз. Солтон-Си (шт. Калифорния)
		Гидротермы островных дуг и областей альпийской складчатостн	Карбонатный, хлоридный	B, NH_4(Ge, W, Cs, Li, As)	Япония, Термы Тосканы (Италия)
		Рассолы и воды артезианских бассейнов	Хлоридный	NaCl, KCl, $CaCl_2$, Mg, Br, I(Li, Cs, Sr, B)	Шт. Мичиган (США) Преф. Никагата (Япония)
		Рассолы современных соленосных бассейнов	Карбонатный	NaCl, Na_2CO_3, K, Li, Br, B(W, Rb)	Оз. Серлс (США), Натрон (Восточная Африка)
			Сульфатиый	NaCl, KCl, K_2SO_4, Na_2SO_4, Mg, Br(Rb, Li)	Большое Соленое озеро (США),
			Хлоридный	NaCl, $CaCl_2$, Mg, K, Li(S, Rb)	Оз. Сильвер-Пик (США),
		Морские воды	Сульфатный	NaCl, $CaSO_4$, Mg, Br, K(U, Li, B, D_2O)	США, ФРГ, Япония
Природно-техногенные	Поверхностные	Сточные воды и рассолы:			
		нефтепромыслов	Хлоридный	Br, I	Шт. Оклахома (США)
		теплоэнергетических установок	»	$CaCl_2$(NaCl, Zn, Pb, Fe, Ag, Li)	Солтон-Си (США)
		солепромыслов и калийных предприятий	»	Br, B, Rb	ФРГ, Франция
		опреснительных установок	Сульфатный	NaCl	Япония

Примечание. В скобках указаны элементы, технология извлечения которых осваивается.

ций достигла 2431 МВт (табл. 18). В самом ближайшем будущем общую мощность геоТЭС в мире намечается довести до 6000 МВт.

Крупнейшая в мире геоТЭС сооружена на базе месторождения сухого пара Гейзеры (США, шт. Калифорния). Общая мощность действующих на базе этого месторождения 18 станций составляет 1237 МВт, в процессе строительства находится еще 7 геоэнергетических установок с суммарной мощностью 581 МВт. Эксплуатация геоТЭС показала их конкурентоспособность по сравнению с другими типами электростанций. Экономическая эффективность эксплуатации геоТЭС стимулирует разведку новых месторождений парогидротерм.

Природные теплоносители с относительно низким теплосодержанием (в основном с температурой до 100 °С) аккумулируются в пластовых водонапорных системах молодых платформ, межгорных и предгорных впадин. Запасы этих вод выше на порядок и более по сравнению с высокопотенциальными теплоносителями областей современного вулканизма и горноскладчатых областей. Масштабы теплотехнического использования этих вод по отдельным странам приведены в табл. 19.

Обращают на себя внимание высокие показатели по ВНР и Исландии. При этом в ВНР геотермальные ресурсы используются в основном для отопления теплиц и оранжерей, общая площадь которых составляет более 200 га. В Исландии вклад геотермальных ресурсов в топливно-энергетический баланс страны в 1980 г. составил 38,5 %, а в общем объеме энергетических затрат на теплоснабжение по стране в целом доля геотермальных ресурсов составила 81 %. В перспективных проработках (до 2000 г.) предусматривается увеличение масштабов использования геотермальной энергии в Исландии в 3,5 раза. Во Франции производство и потребление энергии на базе возобновляемых источников (в основном геотермальных) в 1982 и 1983 гг. составило соответственно 3,6 и 3,7 млн. т (в пересчете на нефть) при общем уровне производства 64,2 и 71,6 млн. т (увеличение в 1983 г. вызвано ростом производства электроэнергии на АЭС) — на долю возобновляемых ее источников пришлось более 5 %. Увеличению использования геотермальной энергии способствуют высокие экономические показатели эксплуатации систем теплоснабжения на базе геотермальных ресурсов. Себестоимость одного киловатт-часа (теплового) составляет $4{,}7 \cdot 10^{-3}$ долл., что в четыре раза дешевле по сравнению с индивидуальными системами теплоснабжения на мазуте и на 30 % дешевле теплоснабжения на базе электроэнергии, отпускаемой по ночному тарифу.

Кроме того, термальные воды некоторых месторождений используются для лечебных целей, извлечения ценных компонентов и различных технических нужд .

Низко- и среднепотенциальные подземные воды (с температурой в основном до 100 °С), приуроченные к пластовым водонапорным системам, наиболее широко используются в таких зарубежных странах, как ВНР и Франция.

Таблица 18

Мощность геотермальных электростанций (в МВт). По А. А. Самохину

Местонахождение геотермальных электростанций	Мощности действующих станций	Определенно-запланированный прирост мощностей	Предположительно запланированный прирост мощностей
США			
Гейзеры	908	1100	—
Хот-Спрингс	—	60	—
Другие станции	—	—	1010
Италия			
Лардарелло	381	—	—
Травале	18	15	—
Монте-Амиата	22	—	—
Монтеротондо	—	26	—
Торре-Альфина	—	—	15
За счет повышения производительности действующих станций	—	—	45
Филиппины			
Тиви	220	110	200
Мак-Бан	220	110	55
Тонгонан	8	112	330
Полимпинон	3	112	220
Новая Зеландия			
Уайракей	192	—	—
Каверау	10	—	—
Броадлендз	—	165	—
Япония			
Какконда	50	—	—
Хатчёбару	50	—	—
Оникобе	25	—	—
Мацукава	22	—	—
Отаке	11	—	—
Онума	10	—	—
Мора	—	50	—
Другие станции	—	—	280
Мексика			
Серро Прието	150	110	220
Лос-Азуфрес	—	50	—
Исландия			
Крафла	60	—	—
Намафьядль	3	—	—
Сальвадор			
Аучапан	60	40	—
Турция			
Кизилдере	5	5	—

Продолжение табл. 18

Местонахождение геотермальных электростанций	Мощности действующих станций	Определенно-запланированный прирост мощностей	Предположительно запланированный прирост мощностей
КНР			
Тенгву, Янгбаянинг и др. станции	3	7	—
Индонезия			
Камоджанг	—	30	—
Тапанули	—	13	—
Кения			
Олкария	—	30	60
О. Гваделупа (Франция)			
Батонльянте	—	30	—
Никарагуа			
Момотомбо	—	30	30
Чили			
Татно	—	30	—
Пучульдиза	—	—	20
О. Тайвань			
Татун	—	10	—
Индия			
Пуга Вэлли	—	1	—
Эфиопия			
Район озер	—	—	10

В ВНР имеется более 650 скважин на термальные воды глубиной 500—2500 м, из которых 500 эксплуатируются. Основные эксплуатационные запасы вод приурочены к мощному, многослойному плиоценовому водоносному комплексу Паннонского бассейна, который занимает половину территории страны. В его пределах добывается до 80 млн. м^3/год (около 220 тыс. м^3/сут) термальных вод, используемых для теплоснабжения теплиц, бальнеологии, коммунально-бытового и питьевого водоснабжения, вторичных методов добычи нефти и в рекреационных целях (в основном плавательные бассейны). Общая мощность плиоценового комплекса достигает 2000 м, эффективная мощность коллекторов в его разрезе составляет 20—60 %. Температура воды 35—130 °С; воды в основном гидрокарбонатно-натриевого состава, в глубоких частях бассейна повышается содержание хлора. Общая минерализация 1—5 г/л. В Паннонском бассейне функционирует хорошо технически оснащенная сеть наблюдений за режимом подземных

Таблица 19

Использование геотермальной энергии (в МВт) тепловой мощности

Страна	В коммунальном теплоснабжении	В сельском хозяйстве	В промышленности	Всего
Исландия	634	38	15	687
ВНР	35	317	15	367
НРБ	~20	~100	~10	~140
США	75	5	5	85
Новая Зеландия	32	—	43	75
Япония	36	27	—	63
Италия	37	2	23	62
ЧССР	—	10	—	57
СРР	—	20	—	47
Франция	40	—	—	40
КНР	~16	—	8	24
Индия	—	1	—	1

вод. Данные наблюдений свидетельствуют о постоянном снижении напоров термальных вод, чем и вызван перевод большинства скважин на насосную эксплуатацию. Для подъема воды используются как турбинные (штанговые) насосы с электродвигателем на устье скважины, так и погружные насосы с охлаждением двигателя. Широко применяются автоматические устройства для контроля работы водозаборных скважин и регулирования подачи теплоносителя потребителю. Так, например, на крупном тепличном комбинате в районе г. Сенгеш осуществляется автоматическое регулирование подачи воды в теплицы, в зависимости от температуры воздуха в них, необходимости полива и т. д. Обращают внимание рациональные схемы водозаборов в условиях мощного водоносного комплекса, в частности, организация кустов скважин на ограниченной площадке, эксплуатирующих различные продуктивные интервалы. Это обеспечивает наиболее полную «сработку» запасов по мощности комплекса и удобство обустройства водозабора.

В настоящее время в ВНР перспективы использования геотермальной теплоэнергетики на базе природных теплоносителей связаны с внедрением метода разработки месторождений, основанного на возврате добываемого теплоносителя (после использования его полезных свойств) в продуктивную зону с целью поддержания пластовых давлений. Этот метод был реализован в г. Сегед, где термальные воды широко используются для отопления и горячего водоснабжения.

Во Франции, национальная экономика которой в силу слабой обеспеченности собственными топливно-энергетическими ресурсами существенно зависит от импорта нефти, геотермальная теплоэнергетика быстро развивается с конца 60-х — начале 70-х годов. Для целей теплофикации используются низко- и среднепотенци-

альные (27—98 °С) воды, как правило, повышенной минерализации (до 20 г/л), в основном Парижского и Аквитанского артезианских бассейнов в районе Эльзаса. Термальные воды рассматриваются как национальное достояние, которое не зависит от колебаний в стоимости других видов энергии и обеспечивает в какой-то степени независимость от импорта нефти и газа.

К середине 1984 г. в стране пробурено 111 геотермальных скважин, в том числе 81 в Парижском бассейне. Глубины скважин изменяются от 1000 до 3200 м. Воды используются для теплоснабжения коммунально-бытовых и сельскохозяйственных объектов. К 1990 г. за счет освоения более глубоко залегающих водоносных комплексов указанных бассейнов (например, лузитанский и триасовый водоносный комплексы Парижского бассейна), содержащих воды с температурой около 100 °С, но отличающихся более высокой минерализацией и газонасыщенностью, планируется расширить отопление и горячее водоснабжение коммунально-бытовых объектов до 850 тыс. условных квартир.

Характерной особенностью развития геотермальной теплоэнергетики во Франции в настоящее время является широкое применение метода интенсивной разработки, основанного на закачке теплоносителя после использования его температурного потенциала в продуктивные объекты. Этим достигается восполнение ресурсов термальных вод, поддержание пластовых давлений и безопасный для окружающей среды сброс минерализованных вод. Нагрев водопроводной воды производится термальными водами добываемыми через систему теплообменников. Система, называемая «геотермальной петлей», состоит из продуктивной скважины, насоса для откачки, теплообменника, нагнетательного насоса и нагнетательной скважины. В системе поддерживается оптимальное давление, предупреждающее опасность солеотложений в скважинах, теплообменниках и трубопроводах. В настоящее время во Франции действует 40 таких установок. С геолого-экономических позиций характерной особенностью этих установок является их количественное размещение, учитывающее использование минимальной площади: устья эксплуатационной и нагнетательной скважин размещаются на одной площадке, на незначительном (10—20 м) удалении друг от друга. Забои же этих скважин расположены на уровне продуктивного комплекса, разведанного в результате направленного бурения на глубину 1000—1500 м, что позволяет при производительности установки до 200—300 м^3/ч (4800—7200 м^3/сут) обеспечивать получение теплоносителя с неизменной температурой в течение всего расчетного срока, принимаемого равным 30 годам. Учитывая столь высокую производительность, применяются конструкции скважин больших диаметров.

Одной из тенденций развития геотермальной энергетики за рубежом, характерной для последнего времени, является использование низкопотенциальных (30—60 °С) термальных вод, а также использование водоносных горизонтов в качестве аккумуляторов энергии. Эти задачи успешно решаются с применением тепловых

насосов. Особый интерес представляют опытно-промышленные работы, выполненные в ряде стран Западной Европы, по аккумуляции в водоносных горизонтах тепловых отходов, а также комплексное использование водоносных горизонтов, содержащих слаботермальные и холодные воды для теплохладоснабжения объектов. Во Франции по одной из разработаниых схем холодная вода, добываемая скважиной из водоносного горизонта, используется в летнее время для кондиционирования воздуха в помещениях; нагретая вода после выхода из кондиционеров закачивается через другую скважину в этот же водоносный горизонт и образует в ием скопление тепла. В зимнее время рассмотренный дублет скважин эксплуатируется в обратной последовательности: из бывшей нагнетательной скважины добывается захороненный летом теплоноситель, который после охлаждения в системе отопления закачивается в бывшую эксплуатационную скважину. Выполненные расчеты и наблюдения в течение трех сезонов показали, что коэффициент полезного действия такой дублетной системы может составлять 0,6—0,7. Причем энергетический базис для третьего цикла характеризуется следующими показателями (в %): потеря энергии через кровлю водоносного горизонта — 13, через подошву — 8, «рассеивание» энергии в горизонте и потери при добыче — 12, полезно используемая энергия — 67.

В СССР изучению и использованию подземных теплоэнергетических вод уделяется большое внимание; интенсивно ведутся геологоразведочные работы с целью оценки их запасов. На 1 января 1984 г. разведанные как теплоэнергетическое сырье и утвержденные в ГКЗ СССР запасы термальных вод пластовых систем с температурой 50—100 °С составили 290 тыс. м³/сут и пароводяных смесей с температурой 160—210 °С — 33 тыс. т/сут. Эти запасы используются для обогрева 70 га теплиц, обогрева и горячего водоснабжения жилых и общественных помещений в городах Грозном, Зугдиди, Кизляре, Махачкале, Тбилиси и в ряде других населенных пунктов. Кроме того, термальные воды используются для технических нужд (ферментация чая, сушка, пропарка древесины, мойка шерсти и др.), для плавательных бассейнов, рыборазведения и др. Общая экономия топлива от использования термальных вод составляет 400 тыс. т условного топлива в год в настоящее время и будет возрастать быстрыми темпами в ближайшем будущем.

Во многих местах воды с температурой 40—90 °С, разведанные для бальнеологических целей, используются и для теплоснабжения. В различных нефтеносных районах страны разведаны большие запасы термальных вод с температурой 40—80 °С в целях закачки в нефтеносные пласты, что способствует увеличению их нефтеотдачи и экономит топливные ресурсы, расходуемые на подогрев закачиваемых вод. Разведаны также запасы промышленных вод с температурой 50—90 °С, что позволит не только извлекать из них химически ценные элементы, но использовать также

тепловой потенциал вод. К настоящему времени выполнены предварительные геолого-экономические оценки возможности освоения ресурсов термальных вод как традиционными методами (то есть самоизливом или путем принудительной насосной откачки), так и с применением обратной закачки термальных вод в продуктивные горизонты после использования полезных свойств этих вод. Оценки показали достаточно высокую эффективность этого интенсивного метода извлечения геотермальных ресурсов, позволяющего существенно увеличить их вклад в топливно-энергетический баланс страны при одновременном решении вопросов безопасного сброса образующихся промышленных сточных вод. Использование только 1—5 % эксплуатационных ресурсов термальных вод с температурой более 50 °С и минерализацией менее 35 г/л, подсчитанных для условий применения метода ППД, может обеспечить в основных перспективных районах экономию в 130—135 млн. т условного топлива. Такое резкое увеличение ресурсов при рассмотренных методах их извлечения — без ППД и с ППД — находит объяснение в существенно различных источниках формирования эксплуатационных запасов воды и тепла. Так, при разработке без ППД эксплуатационные запасы термальных вод формируются в основном за счет сработки упругой части естественных запасов, а также естественных ресурсов и, в благоприятных условиях, — привлекаемых запасов, а их теплоэнергетический потенциал — за счет естественного (рассеянного) теплового потока земли. При разработке же водоносных комплексов с ППД в формировании эксплуатационных запасов термальных вод решающую роль начинают играть емкостные и искусственные запасы, создаваемые при нагнетании в пласты использованных термальных вод. Что касается формирования в этом случае теплоэнергетического потенциала термальных вод, то здесь происходит сработка естественных (геологических) запасов тепла, аккумулированных подземными водами и скелетом водовмещающих пород, а также (в меньшей степени) привлекаемых запасов тепла со стороны ограничивающих водоупоров. Очевидно, что во втором случае источники формирования эксплуатационных запасов воды и тепла на несколько порядков выше, чем в первом.

Результаты геолого-экономических оценок гидрогеотермальных ресурсов, анализ накопленного в СССР и за рубежом опыта их промышленного освоения и теплоэнергетического использования показывают, что при внедрении интенсивных методов извлечения они могут обеспечить заметный вклад в топливно-энергетический баланс страны. При этом первоочередными районами изучения и освоения ресурсов термальных вод пластовых водонапорных систем являются районы развития самоизливающихся вод с температурой более 50 °С и минерализацией до 10 г/л. К их числу относятся Предкавказье, западная часть Грузии, Южный Казахстан, отдельные участки в пределах Куринского, Равнинно-Крымского, Сахалинского и южной части Западно-Сибирского артезианских бассейнов.

Следует отметить, что в отечественной практике метод ППД уже применяется. В частности, он был использован при разработке Ханкальского месторождения термальных вод пластового типа в районе г. Грозного, обеспечивающего теплоснабжением тепличный комбинат площадью 6 га. Закачка «сработанных» термальных вод в продуктивный горизонт проводится через 4 скважины. Применение этого метода привело к быстрому восстановлению пластового давления и увеличению производительности водозабора (дебита самоизливающихся скважин), при благоприятных технико-экономических показателях.

Минеральные воды

Минеральные воды СССР представлены всеми основными видами специфических минеральных вод: углекислыми, сероводородными, углекислосероводородными, радоновыми, мышьяковистыми (мышьяковыми), йодными, бромными, йодо-бромными, железистыми, слабоминерализованными щелочными кремнистыми термами и др. В каждом из этих типов вод в свою очередь выделяются разновидности, отличающиеся друг от друга концентрацией биологически активного компонента, ионным составом, минерализацией и пр. Количество разновидностей минеральных вод, не содержащих повышенных концентраций специфических биологически активных веществ, также очень велико. Учитывая это, при характеристике распределения различных типов минеральных вод в пределах отдельных гидрогеологических областей упоминаются лишь основные крупные группы минеральных вод. В табл. 20 приведены некоторые разновидности минеральных вод, наиболее часто представляющие эти группы, а также указаны их аналоги из числа вод, хорошо известных и используемых в лечебных целях.

От комплекса свойств, которыми обладает минеральная вода, зависит характер ее лечебного использования. Минеральные воды применяются в качестве лечебно-питьевых, для купаний (ванны, проточные ванны, бассейны), для ингаляций и ряда других процедур. Многие минеральные воды находят применение при различных видах лечебного использования и являются одновременно бальнеологическими, лечебно-питьевыми и столовыми.

Минеральные воды используются как на местах их нахождения — на месторождениях, эксплуатируемых курортами, санаториями и другими лечебными учреждениями, так и вне месторождений, путем бутылочного розлива как лечебно-питьевые воды и в качестве столовых напитков. Практикуется также, однако нешироко, их использование в виде специально изготовленных из них солей.

Месторождения минеральных вод эксплуатируются в СССР курортами и санаториями, местными (городскими, районными и др.) бальнеолечебницами и заводами по бутылочному розливу минеральных вод. Всего в СССР насчитывается около 400 курортов, санаториев и местных бальнеолечебниц, использующих минераль-

ные воды, и порядка 120 заводов розлива минеральных вод. Данные о различных типах минеральных вод и числе лечебных учреждений, базирующихся на данном типе вод приведены ниже.

Специфические воды	56	Неспецифические воды	44
В том числе:		В том числе:	
углекислые	13	сульфатные	8
сероводородные	15	хлоридно-сульфатные	9
радоновые	2	хлоридные	11
слабоминерализованные термы	15	прочие неспецифические	5
прочие специфические	11	рассольные	11

Таким образом, больше всего эксплуатируются месторождения сероводородных, слабоминерализованных кремнистых терм и углекислых вод. Значительно меньше используются другие специфические воды, в частности, совсем немного радоновые. Большое значение в бальнеологии имеют различные неспецифические воды.

Распределение розлива лечебно-столовых и лечебных вод по различным типам минеральных вод (в % от общего объема розлива) характеризуется следующими данными.

Углекислые	45	Неуглекислые	55
В том числе:		В том числе:	
типа Боржоми	10	сульфатные (типа Московской, Краинской)	7
» Ессентуки	11	хлоридно-сульфатные (типа Ижевской, Угличевской)	18
» Нарзана	5	хлоридные (типа Миргородской, Вальмнера)	18
прочие углекислые	19	хлоридно-гидрокарбонатные (типа Рычал-Су)	5
		пресные преимущественно гидрокарбонатные кальциевые (типа Березовской, Регина)	5
		прочие неуглекислые	2

Основная группа минеральных вод, идущих на бутылочный розлив — углекислые воды. Розлив их составляет немного менее половины общего объема розлива. Воды, содержащие заметные количества сероводорода, разливаются в единичных случаях.

Относительное значение углекислых вод в общем объеме розлива постепенно снижается в связи с созданием большого числа разливочных предприятий, базирующихся на месторождениях неуглекислых вод. Этот процесс и в дальнейшем будет развиваться, тем более что содержание в натуральной воде углекислоты не входит в число показателей, учитываемых ГОСТ на лечебные и лечебно-столовые воды бутылочного розлива.

Потребность в минеральной воде бальнеологического учреждения составляет обычно первые сотни и десятки кубических метров в сутки, а крупных бальнеологических курортов — первые тысячи. Для курортов и санаториев, использующих минеральную воду исключительно в качестве лечебно-питьевой воды, потребное

Таблица 20

Основные типы минеральных вод и их характерные представители. *По В. В. Иванову*

Газовый состав	Основной состав ионов	Тип вод	Минерализация, г/л	Характерные представители
		Без специфических компонентов		
N_2	SO_4, Ca	Краинский	2—3	Краинский, Н. Ивкинская
N_2	SO_4, Ca, Mg	Звенигородский	»	Звенигородская, Дороховская
N_2	SO_4, Ca, Mg, Na	Московский-I	3—5	Московская, Монинская, Кашинская-I
N_2	SO_4, Cl, Na, Ca	Феодосийский	4—5	Феодосийская
N_2	SO_4, Cl, Na, Mg	Ижевский	4—5	Ижевская, Хиловская
N_2, CH_4	Cl, SO_4, HCO_3, Na	Махачкалинский	2—5	Колкенская, Махачкалинская
N_2, CH_4	Cl, Na, Ca	Тбилисский	3—5	Н. Кармадонская, Тбилисская
N_2	Cl, SO_4, Na	Сольвычегодский	5—25	Сольвычегодские, Кашинская-II
N_2, CH_4	Cl, SO_4, Na	Шаамбары	15—25	Шаамбары
N_2	Cl, Na	Нижне-Сергинский	5—10	Нижне-Сергинская
N_2	Cl, Na	Евпаторийский	5—10	Евпаторийская
N_2	Cl, Na, Ca	Старо-Русский	15—25	Старо-Русская
N_2	Cl, Na	Красноусольский	25—35	Красноусольская
N_2CH_4	Cl, Na, Ca	Аркеванский	15—25	Аркеванская, Дагинская, Грозненская, Охинская
N_2	Cl, Na	Друскининкайский	50—60	Друскининкай, Паланга, Старая Русса
N_2	Cl, Na	Усольский	70—80	Усольские
N_2	Cl, Na, Ca	Чартакские	60—70	Чартак
N_2	Cl, Na	Кашинский	180—200	Кашин-III
N_2	Cl, Na	Боенский (Московский III)	250—270	Боенская
		Воды углекислые		
CO_2	HCO_3, Ca, Mg(Fe, H_2SiO_3)	Дарасунский	до 4	Дарасун, Шмаковка, Кожаново, Кука, Малка (Кавказ), Ямаровка
CO_2	HCO_3, Na, Mg, Ca	Ласточкинский	до 4	Ласточка, Шиванда, Игнашино, Гонжа, Ширлан, Сираб № 12, Амурская, Сатрме
CO_2	HCO_3, Na, HBO_2	Дилижанский	2—5	Дилижан, Лужанская № 1

CO_2	HCO_3, Na	Боржомский	5—8	Боржоми, Набеглави, Плоское, Авадхарская, Поляна Новая
CO_2	HCO_3, Na	Поляна-Квасовский	8—12	Поляна-Квасова, Поляна-Купель, Уцера
CO_2	HCO_3, SO_4, Ca, Mg, Na	Кисловодский	2—5	Кисловодск, Аршан
	HCO_3, SO_4, Na, Ca	Железноводский	3—8	Железноводск, Джермук, Исти-Су
CO_2	Cl, HCO_3, SO_4, Na, Ca	Пятигорский	5—8	Пятигорск
CO_2	HCO_3, Cl, Na, Ca	Джавский	5—8	Джава, Кавминводская-I, Зваре, Анкаван, Сойминская
CO_2	HCO_3, Cl, Na	Ессентуки 4	8—10	Ессентуки 4, Важас-Цхаро, Северо-Кумская
CO_2	HCO_3, Cl, Na	Ессентуки 17	10—14	Ессентуки 17, Нагутская 9, Арзни
CO_2	Cl, Na, H_2SiO_3	Ереванский	35—150	Птгни, Раздан, Азатаван, Розовка, Вышково, Шаян

Воды сульфидные

N_2	SO_4, HCO_3, Ca	Хиловско-Кемерский	2—3	Хилово, Кемери
CH_4, N_2	Cl, Na	Сухумский	5—15	Сухумские, Ейск
N_2, CH_4	Cl, HCO_3, Na	Серноводский	2—5	Серноводск, Овалово
N_2	SO_4, Cl, HCO_3, Na, Ca	Арчманский	1,6	Арчман
CH_4, N_2	SO_4, HCO_3, Na, Ca	Тбилисский 1	0,4	Тбилиси
N_2	Cl, Na	Иркутский	60,3	Иркутск
N_2, CH_4	SO_4, HCO_3, Ca, Mg	Сергиевский	2—5	Сергиевск, Минеральные воды, Любень Великий, Синякское
CO_2, N_2	HCO_3, Cl, N	Кумагорский	2—5	Шербинцы, Кумагорская
N_2, CH_4	Cl, Na	Менджи	5—15	Менджи, Чангырташские, Чапаевская
CH_4	Cl, HCO_3, Na	Шиховский	15—20	Шихово
N_2, CH_4	SO_4, Ca, Mg	Тамисский	2—5	Тамисса
N_2, CO_2	Cl, Na	Нукутский	35—150	Нукуты, Сызрань
CH_4, CO_2, N_2, H_2S	Cl, Na	Старо-Мацестинский	5—15	Старая Мацеста
N_2	SO_4, Cl, Na, Ca, Mg	Ключевский	3—5	Ключевская, Красноусольская
CH_4, CO_2, N_2, H_2S	Cl, Na	Новая Мацеста	25—35	Новая Мацеста, Хоста, Кудепста
CH_4, N_2	Cl, Na	Усть-Качкинский	35—150	Усть-Качка
CH_4, CO_2, N_2, H_2S	Cl, Na, Ca	Талгинский	6,3	Талгинская, Чимионские

Продолжение табл. 20

Газовый состав	Основной состав ионов	Тип вод	Минерализация, г/л	Характерные представители
CH_4, CO_2, N_2, H_2S	Cl, SO_4, Na, Ca	Лючобский	10—20	Лючобские
CH_4, CO_2, N_2, H_2S	Cl, Na	Гаурдакский	150—350	Гаурдакский
CH_4, CO_2, N_2, H_2S	Cl, Ca	Тыретский (Былыхтинский)	350—600	Тыретские, Былыхтинская, Осинская
		Радоновые		
N_2, O_2	HCO_3, Ca, Mg	Липовский	до 0,5	Липовка, Житомирская
N_2, O_2	HCO_3, Na, Ca	Увильдинский	до 0,5	Увильда, Колывань
N_2	SO_4, Na	Цхалтубский	0,8	Цхалтубо, Нилова Пустынь
N_2	SO_4, HCO_3, F, Na	Белокурихинский	до 0,5	Белокуриха, Былыринская, Ак-Су
N_2	Cl, Na, Ca	Джеты-Огуз	12—13	Джеты-Огуз
CO_2	HCO_3, Ca, Mg	Молоковский	до 1	Молоковская, Багырсах, Пятигорск
CO_2	Cl, HCO_3, SO_4, Na, Ca	Пятигорский III	2—6	Ямкун, Хмельникский
CO_2	HCO_3, Cl, Ca, Na	Хмельникский		
N_2	Cl, Na	Усть-Кутский	до 150	Красноусольская, Усть-Кут
		Мышьяковистые		
CO_2	HCO_3, Ca, Na	Чвижипсинский	2—5	Чвижипсинская
CO_2	Cl, HCO_3, Na	Синегорский	20—25	Синегорская, Дарыдагская, Джульфинская, Вардзинская
CO_2	HCO_3, Cl, Na, Ca	Нагаджирский	9—11	Нагаджирская
CO_2	HCO_3, Cl, Na, Ca	Горнотисненский	2—5	Горная Тисса, Верхние, Исти-Су
CO_2	Cl, Na	Налачевский	4—10	Налачевская, Верхне-Кармадонская

		Желези
N_2	SO_4, HCO_3, Ca, Mg, Fe	Марциальные
N_2, CO_2	SO_4, Na, Fe, Ca	Джусалинский
N_2	HCO_3, Cl, SO_4, Ca, Fe	Полюстровский
		Полимета
CO_2	HCO_3, Ca	—
N_2	SO_4, Ca, Fe	—
N_2	SO_4, Fe	—
N_2	SO_4, Na, Al, Ca	—
N_2	SO_4, Fe, Na, Al	—
		Кремнистые т
N_2	HCO_3, Cl, Na	Кульдурский
N_2	SO_4, Cl, Na	Начикинский
CO_2, N_2	Cl, Na	Паужетский
N_2	Cl, Na, Ca	Чаплинский
		Воды с высоким содержани
CO_2, N_2	HCO_3, Ca, Mg	Нафтуся
		Сероводородно-
CO_2	SO_4, Na, H	Курило-Камчатский
CO_2	Cl, HCO_3, SO_4, Na, Ca	Пятигорский II
CO_2	HCO_3, Cl, Na	Ессентуки II

стые

0,4	Марциальная № 1
1	Джусалинская
0,27	Полюстровская, Марциальная № 3

льные

1,6	Келечинская
5,6	Зубийская
74,1	Блявинская
6,9	Гайская
15,9	Дегтярская

ермальные

0,4—0,5	Кульдурская, Ташкентская, Ходжа-Оби-Гарм, Оби-Гарм, Тальская
1,2	Начкинская, Паратунская
3,1—4,6	Паужетская, Горячий Пляж, Гейзерная
18,2	Чаплинская

ем органических веществ

0,8—1	Нафтуся, Сходницкие, Кала-Алты, Ундорская, Збручанская

-углекислые

4,8	Северо-Менделеевская (о. Кунашир)
2,7	Серно-Заводская
5,3	Пятигорская
3,3	Гарм-Чашме
6,7	Ессентукская (серные)

количество ее весьма ограничено (единицы, иногда первые десятки кубических метров в сутки). Всего курортами, санаториями и другими лечебными учреждениями СССР в настоящее время потребляется около 50 тыс. м³/сут минеральной воды.

Потребность в эксплуатационных ресурсах минеральных вод в дальнейшем будет возрастать по мере расширения сети санаторно-курортных учреждений и местных бальнеолечебниц, т. е. бальнеологических учреждений, находящихся в ведении местных органов здравоохранения или отдельных крупных промышленных, сельскохозяйственных и транспортных предприятий. Развитие санаторно-курортной сети СССР, осуществляемое согласно перспективному плану, разработанному ВЦСПС, требует введения в эксплуатацию ежегодно одного—двух новых бальнеологических курортов и увеличения числа коек на действующих бальнеологических курортах приблизительно на 10 тыс. в год. Такому развитию соответствует ежегодное увеличение потребности в эксплуатационных ресурсах минеральных вод на 2500—3000 м³/сут., т. е. на 10 % от современного потребления минеральных вод бальнеологическими учреждениями Советского Союза.

Потребность в минеральных водах, определяемая развитием сети внекурортных бальнеолечебниц, постоянно растет. В дальнейшем темпы роста потребности повысятся, поскольку само внекурортное (амбулаторное) использование минеральных вод высокоэффективно и позволяет охватить бальнеолечением широкие слои населения без отрыва от производства.

Розлив 1 млн. поллитровых бутылок в год обеспечивается дебитом минеральной воды порядка 2,5—3 м³/сут, даже если потери воды в процессе розлива принять равными 30 % от общего эксплуатационного расхода ее (на заводах розлива Боржоми производственные потери минеральной воды в настоящее время не превышают 20—25 %). Производительность отдельных заводов варьирует в широких пределах. Наряду с заводами, выпускающими многие десятки и даже сотни миллионов бутылок в год, имеются и небольшие цехи розлива, продукция которых не превышает сотен тысяч бутылок в год. Эксплуатационный расход минеральных вод, необходимый для обеспечения современной суммарной мощности предприятий бутылочного розлива минеральных вод, составляет ориентировочно 4—5 тыс. м³/сут.

Наиболее распространены Нарзан, Ессентуки, Боржоми, Железноводские воды (Славянская, Смирновская), Джермук, Анкаван, Арзни. Их розлив составляет 30—35 % от общего объема розлива минеральных вод СССР. Воды типа Саирме, Скури, Бадамлы, Нафтуся, Березовская, Закарпатские, Миргородская потребляются менее, чем воды первой группы. Наконец, многие минеральные воды имеют почти исключительно местное (республиканское и межобластное) значение.

До недавнего времени потребление минеральных вод на душу населения по отдельным республикам и относительное значение вод местного розлива характеризовались показателями, приведен-

Таблица 21

Потребление минеральных вод на душу населения и относительное значение вод местного розлива

Республика, район	Потребление бутылок в год	Относительное значение, % от общего объема потребления
УССР	6,9	89
БССР	0,8	4,2
Узбекская ССР	2,9	72
Казахская ССР	2,1	37
Грузинская ССР	11,5	96
Азербайджанская ССР	7,2	89
Литовская ССР	2,5	70
Молдавская ССР	5,3	66
Латвийская ССР	2,6	11,8
Киргизская ССР	2,4	26
Таджикская ССР	2,1	1,8
Армянская ССР	8,2	93
Туркменская ССР	4,6	6,5
Эстонская ССР	2,0	0
РСФСР		
Северо-западный	2,1	6,8
Волго-Вятский	0,6	0
Центр Европейской части	1,9	10
Центрально-черноземный	0,9	32
Северо-Кавказский	6,5	81
Поволжье	1,3	28
Уральский	1,1	8,6
Западно-Сибирский	0,7	0
Восточно-Сибирский	1,1	64
Дальневосточный	2,4	79

ными в табл. 21. В настоящее время значение вод местного розлива заметно возрастает благодаря осуществляемому увеличению мощности имеющихся на местах предприятий по розливу минеральных вод и организации розлива на территориях, где раньше использовались только привозные воды, как, например, в Эстонской ССР и Волго-Вятском и особенно Западно-Сибирском географо-экономических районах.

Потребление минеральных вод бутылочного розлива в СССР в среднем составляет 5,5 бутылок на душу населения в год. Значительно больше потребляют минеральных вод в Грузии, Азербайджане, на Украине, в Армении и в Северо-Кавказском районе, т. е. в тех районах, где производится в большом объеме (80—90 % от общего потребления) розлив минеральных вод. Близкое к среднему значению потребление в Молдавии и Туркмении; в остальных республиках и районах РСФСР — значительно ниже среднего. При этом основное значение имеют привозные воды.

Приведенные сведения показывают, что распределение заводов розлива на территории СССР и их современная производи-

тельность далеко не соответствуют потребности населения в минеральных водах бутылочного розлива как общей для СССР, так и отдельных его территорий. В настоящее время проводятся мероприятия, направленные на значительное увеличение розлива минеральных вод. При этом особое внимание уделяется созданию разветвленной сети заводов розлива, рассредоточенных на территориях как Европейской, так и Азиатской частей СССР.

Попутные воды месторождений полезных ископаемых

В классификации природных вод В. И. Вернадский выделяет в самостоятельное семейство попутные воды, формирующиеся при разработке нефтяных, угольных, рудных и других месторождений полезных ископаемых.

Попутные воды — это подземные воды, которые извлекаются на поверхность земли в процессе разработки месторождений полезных ископаемых. К ним относятся воды эксплуатационных скважин, горных выработок, а также отвалов и терриконов. Главная особенность этих вод заключается в том, что они всегда формируются в условиях глубоко нарушенных гидродинамического и геохимического режимов. Попутные воды месторождений изучаются главным образом по двум направлениям: 1) оценка попутных вод как возможного источника ценных компонентов (или как возможного гидроминерального сырья); 2) оценка попутных вод как одного из факторов вредного влияния на природную среду. В данной работе рассматриваются попутные воды месторождений нефти, углей и руд цветных металлов и редких элементов.

В результате исследований установлено, что попутные воды содержат значительное число компонентов, представляющих интерес для различных отраслей народного хозяйства. Так, в водах многих нефтяных месторождений содержатся высокие концентрации рубидия, цезия, калия, стронция, йода, брома, бора и других элементов. В водах месторождений некоторых угольных бассейнов отмечены высокие концентрации редкоземельных элементов, редких металлов, а также железа, алюминия и др. Воды рудных месторождений нередко содержат весьма высокие концентрации цинка, меди, свинца, никеля, кадмия и других элементов. Концентрации перечисленных выше элементов и количество извлекаемых на поверхность попутных вод дают основание рассматривать их в качестве потенциального минерально-сырьевого источника получения промышленно-ценной товарной продукции.

Научно-исследовательскими работами ВСЕГИНГЕО и других организаций предварительно доказано, что рентабельность извлечения ценных товарных продуктов из попутных вод возможна лишь при условии комплексной безотходной технологии переработки этих вод. Последнее решает и вопросы охраны окружающей среды, так как известно, что в процессе эксплуатации месторождений сбрасываемые воды нередко являются мощным очагом загрязнения. Отсюда следует, что изучение, оценка и комплексное

освоение попутных вод могут и должны способствовать рациональному освоению недр. Целесообразность вовлечения попутных вод в промышленное использование обусловливается тем, что: для их выявления нет необходимости в проведении полного комплекса дорогостоящих геологоразведочных работ (горные выработки, бурение и т. д.); отпадают затраты на добычу, поскольку они извлекаются на поверхность в процессе эксплуатации одновременно с основным полезным ископаемым; использование попутных вод будет способствовать снижению себестоимости добычи основного полезного ископаемого за счет дополнительно получаемой продукции, устранению непроизводительных затрат на очистку этих вод перед сбросом в открытые водоемы или их закачку в глубокие горизонты земной коры и возможности повторного использования этих вод для технических целей, орошения и т. д.; снижаются затраты на мероприятия по окружающей среды; обеспечивается получение комплекса дополнительной ценной для народного хозяйства товарной продукции; себестоимость получаемой продукции из этих вод определяется в основном себестоимостью технологического передела; после отработки основного полезного ископаемого (нефти, угля и т. д.) сырьевая база этого месторождения (при подтверждении целесообразности использования попутных вод) может быть передана для добычи собственно гидроминерального сырья, что дает значительный экономический эффект.

Промышленного производства по комплексному использованию подземных вод в качестве сырьевого источника в СССР пока не имеется. Однако отдельные разработки по технологии извлечения целого ряда промышленно-ценных компонентов, в частности из попутных вод нефтяных месторождений, указывают на возможность и рентабельность такого производства. Не менее важным вопросом комплексного использования попутных вод месторождений полезных ископаемых является охрана окружающей среды.

Глава 2
ПОНЯТИЕ О ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

В соответствии с целевым использованием глубоких подземных вод для нужд человека и промышленности в СССР принято подразделять их на промышленные, минеральные и теплоэнергетические. С точки зрения особенностей формирования состава и ресурсов это подразделение достаточно условно. Тем не менее, такое подразделение подземных вод является устоявшимся и используется в системе планирования разведочных работ, государственного учета запасов, народнохозяйственного освоения разведанных запасов.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ВОДЫ

Представления о промышленных водах претерпели существенную эволюцию. В общем смысле под промышленными водами при-

нято понимать подземные воды, содержащие в повышенных количествах полезные компоненты или их соединения, которые возможно извлекать и эффективно использовать в народном хозяйстве. Длительное время однозначных критериев для отнесения тех или других подземных вод к промышленным или непромышленным не удавалось выработать. Одной из основных причин этого было то, что первые попытки классификации и типизации промышленных вод основывались исключительно на их составе и содержании полезных компонентов, а более важные факторы (глубина залегания и параметры продуктивных комплексов, природные и экономические условия, общая величина запасов и др.) вообще не учитывалась.

Одна из первых классификаций промышленных вод была предложена Н. А. Плотниковым. Она основана на кларковых содержаниях рассеянных элементов в земной коре, их концентрациях в морской воде и водах суши, а также предельных концентрациях специфических компонентов в водах лечебного назначения (табл. 22). Эта классификация полезна для систематизации природных вод по их составу и для районирования с выделением регионов распространения промышленных вод различных типов.

С целью стимулирования выявления и поисков новых перспективных площадей и месторождений промышленных вод Госхим-

Таблица 22

Классификация бромных, йодных, борных и других вод. *По Н. А. Плотникову*

Воды	Минимальные концентрации	
	мг/л	%
Специфические (по микрокомпонентному составу)		
Бромные	25	$2{,}5 \cdot 10^{-3}$
Йодные	1	$1 \cdot 10^{-4}$
Йодо-бромные	1 (I), 25 (Br)	$1 \cdot 10^{-4}$ (I) $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ (Br)
Борные	10	$1 \cdot 10^{-3}$
Йодо-борные	1 (I), 10 (B)	$1 \cdot 10^{-4}$ (I) $1 \cdot 10^{-3}$ (B)
Радиевые	10^{-8}	$1 \cdot 10^{-12}$
Промышленные воды		
Бромные	250	$2{,}5 \cdot 10^{-2}$
Йодные	18	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$
Йодо-бромные	10 (I), 200 (Br)	$1 \cdot 10^{-3}$ (I) $2 \cdot 10^{-2}$ (Br)
Борные	250	$2{,}5 \cdot 10^{-2}$
Йодо-борные	10 (I), 75 (B)	$1 \cdot 10^{-3}$ (I) $7{,}5 \cdot 10^{-3}$ (B)
Радиевые	10^{-5}	$1 \cdot 10^{-9}$

Таблица 23

Требования к промышленным водам, содержащим бром, йод и бор

Извлекаемые компоненты	Минимальные концентрации, мг/л			Щелочность, ммоль/л	Максимальные концентрации, мг/л		
	I	Br	B		Нафтеновых кислот	Галоидопоглощаемость	Нефти
Йод	18	–	—	30***	600	80	40
Бром	—	250	—	90****	600	80	40
Йод и бром	10	200	—	10	600	80	40
Бор и бром	10	150	500* 200**	1 —	600	80	40

* В виде B_2O_3 для получения буры.
** В виде B_2O_3 для микроудобрений.
*** Для вод с температурой до 35 °С.
**** Для вод с температурой более 35 °С при наличии бикарбонатно-кальциевых вод.

комитетом при Совете Министров СССР в 1960 г. были установлены минимальные концентрации по йоду, брому и бору для отнесения тех или иных подземных вод к разряду промышленных (табл. 23).

Следует отметить, что введение Госхимкомитетом условных требований сыграло некоторую положительную роль в получении от геологических организаций новой информации по содержанию в водах йода, брома, бора и других полезных компонентов. Вместе с тем, по ряду месторождений запасы промышленных вод были необоснованно приняты на баланс как реальные объекты для организации сырьевых баз. Последнее связано с уже упомянутым обстоятельством — качество подземных вод является необходимым, но недостаточным условием для отнесения вод к промышленным или непромышленным.

Существуют и другие упрощенные классификации промышленных вод. Примером одной из таких классификаций может служить схема подразделения промышленных вод, согласно которой к главным относятся компоненты, содержания которых превышают кондиционный предел. Путем сочетаний этих компонентов выделяют одно-, двух-, трех- и более компонентные промышленные воды. Схема подразделения вод на группы и подгруппы, предложенная И. К. Зайцевым, приведена ниже.

I. Галитовые
1. Бром-галитовые
2. Бор-литий-галитовые
3. Бор-бром-галитовые и т. д.

II. Бромные
1. Йод-бромные
2. Бор-калий-бромные
3. Бор-литий-бромные и т. д.

III. Йодные	1. Бром-йодные 2. Бор-бром-йодные и т. д.
IV. Борные	1. Бром-борные 2. Калий-бром-борные и т. д.
V. Калиевые	1. Литий-калиевые 2. Бром-калиевые и т. д.
VI. Содовые	
VII. Мирабилитовые	
VIII. Глауберитовые и др.	

Практическое использование этой классификации затруднительно, поскольку нет ясности, как определить промышленные (т. е. кондиционные) концентрации отдельных компонентов, входящих в название вод. Аналогичный подход был принят при выявлении закономерностей распространения и картирования, редкометальных вод на территории СССР [33]. Исходя из имеющейся гидрогеохимической информации, общих условий распространения подземных редкометальных вод и опыта их использования за рубежом приняты следующие условные пределы промышленных концентраций полезных компонентов (в мг/л): Li 10; Rb 3; Cs 0,5; Sr 300; Ge 0,05. Понятно, что при таких концентрациях элементов использование подземных вод в качестве минерального сырья может быть как целесообразным, так и нецелесообразным, поскольку при оценке экономической целесообразности добычи и переработки вод не только концентрация, но и другие факторы могут оказаться более весомыми.

Описанные выше принципы и методы классификации промышленных вод и установления предельных (кондиционных) содержаний полезных компонентов носят ярко выраженный качественный характер. Такой этап качественного изучения промышленных вод принес определенную пользу. В результате проведенных работ и исследований установлены основные закономерности распространения подземных вод, обогащенных теми или другими полезными компонентами, проведено районирование подземных вод различных типов и составлены соответствующие карты. Одновременно выявилась необходимость перехода от качественных описаний к количественным оценкам прогнозных ресурсов и запасов промышленных вод. Такие количественные оценки стали возможными благодаря введению понятия о месторождении промышленных вод, учитывающего не только их качественный состав, но также всю совокупность геологических, гидрогеологических, технических и экономических факторов. Такое понятие было предложено С. С. Бондаренко при картировании прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных йодо-бромных вод СССР.

В последние годы наряду с понятием промышленные воды появился более четкий термин — гидроминеральное сырье. Это сырье представляет нетрадиционный минерально-сырьевой источник с большими перспективами использования его в народном хозяйстве. Гидроминеральное сырье в широком смысле объединяет раз-

личные типы природных вод: подземные воды глубоких водоносных горизонтов, попутные воды месторождений нефти и твердых полезных ископаемых, погребенные (межкристальные) рассолы неоген-четвертичных и современных эвапоритовых бассейнов, рапу некоторых континентальных озер и отшнурованных морских заливов, морскую воду. В СССР основные перспективы использования гидроминерального сырья следует связывать с подземными водами глубоких водоносных горизонтов.

Гидроминеральное сырье принципиально отличается от всех других видов полезных ископаемых, в том числе от твердых, а также от нефти и газа, пресных и минеральных, а в ряде случаев и термальных вод. В сопоставлении с твердыми полезными ископаемыми следует отметить такие особенности гидроминерального сырья:

— широкое региональное распространение в плане и разрезе водонапорных систем (артезианских бассейнов) и значительные геологические запасы, причем запасы некоторых редких металлов в несколько раз превышают запасы их в твердом рудном сырье;

— поликомпонентный состав и возможность комплексной переработки;

— возможность получать сырье с больших глубин и площадей одним водозабором, что для добычи гидроминерального сырья не требует выполнения капиталоемких горных работ;

— способность подземных вод легко обогащаться путем испарительного концентрирования, в том числе солнечного, что позволяет улучшить технологические показатели переработки гидроминерального сырья;

— возможность механизации и автоматизации процессов добычи, сбора и транспортировки воды и др.

Имеются различия также в принципах и методике изучения месторождений гидроминерального сырья и подсчета эксплуатационных запасов. Как известно, запасы большинства полезных ископаемых подсчитываются объемным методом и выражаются в кубических метрах или тоннах руды или полезного компонента. Запасы гидроминерального сырья также подсчитываются объемным методом, но выражаются в единицах расхода воды в кубических метрах в сутки. При подсчете прогнозируются дебит водозабора, понижение уровня воды в эксплуатационных скважинах и качество воды.

Использование гидроминерального сырья связано с необходимостью сброса больших количеств отработанных вод, что весьма нежелательно. Однако этого можно полностью или в значительной степени избежать при глубокой комплексной переработке подземных вод.

Экономическая целесообразность использования подземных вод в качестве гидроминерального сырья определяется их качеством (общий химический состав, концентрация полезных компонентов и содержание вредных примесей), влияющим на затраты при технологической переработке, а также гидрогеологическими и техни-

ческими факторами (глубина залегания водоносных комплексов, параметры вмещающих пород, производительность скважины, характеристики насосного оборудования и др.).

МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ

Согласно определению, впервые данному А. М. Овчинниковым в 1963 г. [35] и в настоящее время практически общепринятому, к минеральным относятся природные воды, которые могут оказывать на организм человека лечебное действие, обусловленное либо повышенным содержанием отдельных терапевтически активных компонентов их ионно-солевого или газового состава, либо общим ионно-солевым составом воды. Таким образом, прямым показателем для отнесения природных вод к минеральным является их свойство оказывать на организм человека лечебное действие при наружном или внутреннем применении, что устанавливается специальными клиническими исследованиями.

Для решения задач, связанных с оценкой и освоением ресурсов минеральных вод, специальные клинические исследования не ставятся. Для отнесения вод к минеральным используются косвенные критерии (особенности химического и газового состава воды и ее физических свойств), которые по аналогии с водами, уже используемыми для лечения, дают основание считать их терапевтически активными. Нормы для отнесения природных вод к минеральным изменяются по мере накопления данных о лечебном действии вод и физиологическом значении отдельных компонентов состава или физических свойств воды. В настоящее время действуют нормы, установленные в 1964 г. Центральным научно-исследовательским институтом курортологии и физиотерапии и согласованные с Министерством здравоохранения СССР, Центральным советом по управлению курортами профсоюзов. Правила разработки месторождений минеральных лечебных вод в СССР и нормы утверждены Госгортехнадзором СССР в 1976 г.

Требования к минеральным водам для внутреннего (лечебно-питьевого) применения определены ГОСТ 23268.0—78, где они разделяются на две группы: воды лечебные (общая минерализация 8—12 г/л) и лечебно-столовые (2—8 г/л). Для обеих групп допускаются, в виде исключения, отклонения от приведенных значений минерализации в зависимости от химического состава и содержания некоторых микрокомпонентов. Для розлива в бутылки могут использоваться минеральные воды, соответствующие не только ГОСТ 23268.0—78, но и ОСТ Министерства пищевой промышленности СССР, включающий так называемые природные столовые воды, минерализация которых 1—2 г/л и менее. Следует отметить, что наименования и подразделения минеральных вод, приведенные в табл. 24, до 1983 г. соответствовали принятым и в Общесоюзном классификаторе. В 1983 г. внесены некоторые изменения, касающиеся подразделения подземных вод по минерализации и температуре.

Классификации минеральных вод основываются на химических и физических свойствах, наиболее важных в лечебном отношении (степень минерализации, особенности основного ионного и газового состава, наличие специфических биологических активных компонентов, температура). В СССР принята классификация минеральных вод, разработанная в Центральном научно-исследовательском институте курортологии и физиотерапии и нашедшая широкое применение в бальнеологической практике [15]. По этой классификации минеральные воды разделяются на 8 бальнеологических групп, при этом одна группа включает все воды без специфических компонентов и свойств, семь остальных выделены по основному компоненту, определяющему наименование группы: I — без специфических компонентов и свойств; II — углекислые; III — сульфидные; IV — железистые, мышьяковистые и «полиметальные» с повышенным содержанием нескольких металлов — Mn, Cu, Pb, Zn, Al и др.; V — бромные, йодо-бромные и йодные; VI — радоновые (радиоактивные); VII — кремнистые термальные; VIII — слабоминерализованные с высоким содержанием органических веществ.

Каждая из групп подразделяется на подгруппы по газовому составу (азотные, метановые, углекислые в разных сочетаниях). При этом учитываются как спонтанные газы, так и растворенные. Минеральные воды при выходе на поверхность могут быть газирующими и негазирующими, в зависимости от количества и растворимости газов в воде. Кроме того, выделяются классы минеральных вод по анионному составу и подклассы — по катионному. В наименовании вод по газовому составу учитываются газы, содержащиеся в водах в количестве не менее 10 % от объема всех газов (растворенных и спонтанных), по ионному составу учитываются ионы, содержащиеся в количестве не менее 20 % от всех анионов и катионов, принимаемых раздельно за 100 %. В каждом из подклассов минеральных вод выделяются воды, отличающиеся минерализацией, содержанием биологически активных компонентов, pH и др. Названия типам минеральных вод даются обычно по географическому названию местности (например, минеральные воды типа «Боржоми», «Ессентуки», «Московская» и т. п.). Типизация минеральных вод позволяет давать бальнеологическую оценку новым минеральным водам по аналогии их состава и свойств с уже известными и применяющимися в лечебной практике. Обязательным условием оценки по аналогии является сопоставление вод по комплексу физико-химических показателей. На практике одну и ту же воду можно отнести к различным группам, если принадлежность ее к категории минеральных вод определяется рядом основных показателей. Общепринятых критериев для таких случаев нет. Обычно принимается во внимание степень влияния этих показателей на терапевтические свойства воды и соответственно ее ценностей. При наличии в воде одновременно двух биологически активных компонентов (в количестве выше установленных норм)

дается двойное наименование, например, углекисло-сероводородные и т. п. Основные группы, типы и разновидности минеральных вод, а также наиболее известные месторождения их приведены в табл. 24, составленной по данным В. В. Иванова и Г. А. Невраева [15].

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОДЫ

Под термином «теплоэнергетические воды» понимаются природные подземные воды, пригодные для использования в народном хозяйстве в качестве источника для получения тепла и (или) выработки электроэнергии. Они подразделяются на собственно термальные воды и парогидротермы. Теплоэнергетические воды, также как и другие виды подземных вод (питьевые, технические, минеральные), используемые в народном хозяйстве, являются полезным ископаемым. При этом они рассматриваются как комплексное полезное ископаемое и могут быть использованы в лечебных целях, как источник получения ценных элементов или их соединений, для различных технологических нужд (сушка, мойка и т. п.).

Основным показателем для отнесения подземных вод к категории теплоэнергетических является их температура. Однако четких и достаточно обоснованных температурных критериев для выделения рассматриваемой категории вод в настоящее время не имеется. Существует несколько классификаций подземных вод по температурному признаку. В «Общесоюзном классификаторе» на полезные ископаемые и подземные воды, применяемом при разработке государственных планов экономического и социального развития народного хозяйства в области минеральных и водных ресурсов и пообъектных планов геологоразведочных работ, а также ведении Государственного учета вод и Государственного водного кадастра, дается следующая классификация подземных вод по температуре (°С).

Исключительно холодная	<4	Теплая	Термальные	34—39
Очень холодная . . .	4—10	Очень теплая		39—45
Холодная	10—20	Горячая		45—70
Прохладная	20—34	Очень горячая		70—100
		Паротермальная . . .		>100

Наряду с этой имеются и другие классификации, применяемые для более узких, специальных целей. Так, например, исходя из требований бальнеологии, В. В. Иванов и Г. А. Невраев подразделяют термальные воды, используемые для лечебных целей, на теплые (слаботермальные): 20—35 °С, горячие (термальные): 35—42 °С и очень горячие (высокотермальные) — с температурой более 42 °С. Для крупного регионального картирования, с учетом возможных направлений практического использования подземных

Таблица 24

Основные критерии оценки минеральных лечебных вод в СССР

Основные показатели оценки	Характеристика	
	показателей	вод
Газовый состав (растворенные и спонтанные газы), %	$CO_2>10$	Углекислые
	Другие газы <10	
	N_2, $CH_4>10$	Азотно-метановые
	$CH_4>N_2$	
	Другие газы <10	
	H_2S, CO_2, $CH_4>10$	Сероводородно-углекисло-метановые и т. д.
	$CH_4>CO_2>H_2S$	
	Другие газы <10 и т. д.	
Газосодержание, мл/г	<10	Очень низкое
	10—100	Низкое
	100—1000	Среднее
	1000—5000	Высокое
	>5000	Очень высокое
Газовый фактор	$<0,1$	Слабогазирующие
	0,1—1	Среднегазирующие
	1—5	Сильногазирующие
	>5	Очень сильногазирующие
Основной ионный состав, %	Cl, Na>20	Хлоридные натриевые
	Другие ионы <20	
	HCO_3, Ca, Mg>20	Гидрокарбонатные
	Ca$>$Mg	Магниево-кальциевые
	Другие ионы <20	
	Cl, SO_4, Na>20	Хлоридно-сульфатные натриевые и т. д.
	Другие ионы <20 и т. д.	
Минерализация, г/л	<2	Слабоминерализованные
	2—5	Маломинерализованные
	5—10	Среднеминерализованные
	10—35	Высокоминерализованные
	35—150	Рассольные
	150—350	Очень крепкие (ультракрепкие) рассольные
	>350	
Специфические компоненты		
Угольный ангидрит (CO_2) растворенный, г/л	0,5—1,4	Слабоуглекислые
	1,4—2,5	Углекислые
	$>2,5$	Сильноуглекислые
Сульфиды (H_2S+HS), мг/л	10—50	Слабосульфидные
	50—100	Среднесульфидные
	100—250	Крепкие сульфидные
	250—500	Очень крепкие сульфидные
	>500	Ультракрепкие сульфидные
Мышьяк (As), мг/л	0,7—5	Мышьяковистые (мышьяковые)
	5,0—10,0	Крепкие мышьяковистые (мышьяковые)
	$>10,0$	Очень крепкие мышьяковистые (мышьяковые)
Железо ($Fe^{2+}+Fe^{3+}$), мг/л	20—40	Железистые

Продолжение табл. 24

Основные показатели оценки	Характеристика показателей	Характеристика вод
	40—100	Крепкие железистые
	>100	Очень крепкие железистые
Бром (Br), мг/л	25—100	Бромные
	100—1000	Бромные высокой концентрации
	>1000	Бромные очень высокой концентрации
Йод (I), мг/л	5—20	Йодные
	>20	Йодные высокой концентрации
Кремниевая кислота	5—100	Кремнистые
($H_2SiO_3+HSiO_3$), мг/л	100—150	Высококремнистые
Органические вещества	>150	Очень высококремнистые
($C_{орг}$), мг/л	10—20	Воды с высоким содержанием $C_{орг}$
	20—30	Воды с очень высоким содержанием $C_{орг}$
Реакция воды (pH)		
	<3,5	Сильнокислые
	3,5—5,5	Кислые
	5,5—6,8	Слабокислые
	6,8—7,2	Нейтральные
	7,2—8,5	Слабощелочные
	8,5—9,5	Щелочные
Радиоактивность, Бк/л	>9,5	Сильнощелочные
	185—750	Очень слаборадоновые
	750—1500	Слаборадоновые
	1500—7500	Радоновые
Температура, °С	>7500	Высокорадоновые
	<0	Исключительно холодные (переохлажденные)
	0—4	Очень холодные
	4—20	Холодные
	20—35	Теплые (слаботермальные)
	35—42	Горячие (термальные)
	42—100	Очень горячие (высокотермальные)
	>100	Исключительно горячие (перегретые)

вод как комплексного полезного ископаемого, Б. Ф. Маврицким выделены следующие группы вод по температуре (°С).

Переохлажденные		<0
Холодные		0—20
Слаботермальные	Термальные	20—50
Термальные		50—75
Высокотермальные		75—100
Слабоперегретые	Перегретые	100—150
Значительно перегретые		150—250
Весьма перегретые		250—375
С надкритической температурой		>375

Ниже приведены данные советских и зарубежных авторов по теплоэнергетическим водам различной температуры (°С).

Воспроизводство и разведение рыбы	20
Плавательные бассейны, обработка биопродуктов, обеспечение процессов брожения и круглогодичных горных работ в районах с холодным климатом, борьба с обледенением техники и оборудования	30
Подогрев открытого грунта, бальнеология (лечебные ванны)	40
Выращивание грибов	50
Животноводство (приготовление кормов и пр.), парниковые хозяйства (обогрев почв и компостов)	60
Пастеризация плодоовощных консервов	70
Отопление помещений, парников	80
Сушка рыбы	90
Сушка органических материалов, морских водорослей, травы, шерсти и т. п.	100
Сушка строительных цементных панелей	110
Дистилляция пресной воды, выпаривание солей	120
Выработка электроэнергии	>150

К теплоэнергетическим относят, как правило, воды с температурой выше 35—40 °С, учитывая при этом, что нижний предел температуры воды, применяемой для обогрева защищенного грунта и для бальнеопроцедур без дополнительного подогрева, составляет 35 °С, а нижний предел температуры воды, употребляемой для горячего водоснабжения, 40—45 °С. В табл. 25 на основании опытов по использованию теплоэнергетических вод приведена их классификация.

Воды низкопотенциальные (с температурой 35—70 °С) можно эффективно использовать для оттаивания мерзлых пород и промывки россыпей, интенсификации рыбоводства, обогрева открытого грунта, для закачки в нефтеносные пласты, для технологических процессов, требующих низкопотенциальных теплоносителей. Для теплоснабжения промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых объектов эти воды имеют ограниченное применение. В основном они используются в районах с благоприятными

Таблица 25

Классификация подземных теплоэнергетических вод

Группа, подгруппа	Температура, °С	Фазовое состояние	
		На глубине	На поверхности
Низкопотенциальные	35—70	Вода	Вода
Среднепотенциальные	70—100	»	»
Высокопотенциальные			
Слабоперегретые	100—150	»	Вода+пар
Перегретые	150—250	»	»
Высокоперегретые	250—350	»	»
Предельно перегретые	>350	»	»
Пар	~240	Пар	Пар сухой насыщенный или перегретый

климатическими условиями или в любых районах с применением пикового догрева.

Воды среднепотенциальные (с температурой 70—100 °С) могут эффективно использоваться для теплоснабжения промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых объектов, для технологических нужд, заводнения нефтяных залежей. Эффективность теплотехнического использования этих вод может быть существенно повышена при оборудовании объектов-теплопотребителей специальными системами отопления и вентиляций, оптимизированными для условий низко-, среднепотенциальных теплоносителей, включая комбинирование этих систем с тепловыми насосами [34].

Воды высокопотенциальные (с температурой более 100 °С) также могут эффективно использоваться для теплоснабжения, а при температурах более 150—160 °С и соответствующих экономических условиях — для выработки электроэнергии.

С учетом возможных сфер практического использования высокопотенциальных вод, сложности бурения поисковых и разведочных скважин, специфики протекания тепломассообменных процессов в водонасыщенных породах и стволах скважин, фазового состояния добываемого теплоносителя целесообразно выделить следующие группы вод (Т, °С): слабоперегретые воды (100—150); перегретые (150—250); высокоперегретые (250—350); предельно перегретые (>350). Последние три группы вод могут использоваться для выработки электроэнергии.

Все перегретые воды, от слабо- до предельно перегретых, в пластовых условиях находятся, как правило, в жидком состоянии, поскольку пластовое давление обычно превышает давление насыщенного пара при данной температуре. Вскипание жидкости с образованием двухфазной системы происходит обычно в стволе скважины, а на поверхность выводится пароводяная смесь (ПВС) с различным соотношением воды и пара, в зависимости от тепловых параметров вскрытого теплоносителя (перегретых вод). Как правило, содержание пара в смеси увеличивается с ростом температуры: для слабо перегретых вод содержание пара, получаемого на поверхности, не превышает 10 %, а в диапазоне температур 200—300 °С составляет в среднем от 20 до 40 %.

Основной теплоэнергетической характеристикой пароводяной смеси (ПВС) является ее энтальпия, или теплосодержание, величина которой находится в прямой зависимости от содержания пара в ПВС. Энтальпия ПВС с содержанием пара до 10 % составляет не более 630—670 кДж/кг, энтальпия теплоносителя (ПВС) с содержанием пара 20—40 % достигает 1260—1470 кДж/кг.

К категории теплоэнергетических вод относят обычно и пар (см. табл. 25). Существование пластового флюида в виде пара встречается в природе крайне редко и для этого необходимы определенные геолого-гидрогеологические и термодинамические условия. Резервуары, содержащие пар, характеризуются довольно однообразными температурами и давлениями: температура колеблется около 240 °С, давление около 3,2 МПа (при содержании

газа в паре не более 5 %). На поверхность скважинами выводится сухой насыщенный или перегретый пар с энтальпией 2800—3000 кДж/кг, используемый для выработки электроэнергии.

Приведенную классификацию рекомендуется применять при проведении специальных поисково-разведочных работ на теплоэнергетические воды. При региональных гидрогеологических исследованиях и изучении термальных вод как комплексного полезного ископаемого (источник тепла, промышленные и лечебные воды) удобно применять классификацию Б. Ф. Маврицкого.

ПОПУТНЫЕ ВОДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В результате исследований накоплен обширный фактический материал по попутным водам *нефтяных месторождений,* их минерализации, химическому составу, концентрациям редких и рассеянных элементов, условиям их залегания и др. Однако этого материала пока недостаточно для решения проблемы использования попутных вод как дополнительного источника гидроминерального сырья, поскольку неизученными остались следующие вопросы: изменение химического состава попутных вод и концентраций в них редких и рассеянных элементов в процессе разработки нефтяных месторождений и особенно с заводнением для поддержания пластового давления (закачка вод различного химического состава и генезиса в настоящее время применяется на большинстве месторождений СССР); количество добываемых с нефтью попутных вод и оценка их запасов; технология извлечения редких элементов из попутных вод различного химического состава; технико-экономические показатели целесообразности переработки попутных вод; последствия сброса попутных вод как в поверхностных, так и в подземных условиях.

К настоящему времени проведен учет количества и качества попутных вод большинства разрабатываемых нефтяных и нефтегазовых месторождений СССР, который позволил оценить перспективность попутных вод как гидроминерального сырья, наметить перспективные районы добычи попутных вод для постановки поисково-оценочных работ, выделить в этих районах наиболее перспективные объекты (месторождения, цеха по добыче нефти и газа) и составить по ним геолого-экономические обоснования комплексного использования попутных вод. Также на ряде нефтяных месторождений предварительно рассмотрено влияние нагнетаемой для поддержания пластового давления воды разного химического состава и генезиса на химический состав и концентрации редких элементов в попутных водах. Кроме того, научно-исследовательскими работами ВСЕГИНГЕО предварительно доказано, что рентабельность извлечения промышленно-ценных товарных продуктов из попутных вод возможна лишь при условии отработки комплексной безотходной технологии. Последняя решает и вопросы охраны окружающей среды, очищая сбрасываемые воды, которые в настоящее время нередко являются мощным очагом загрязнения.

Таким образом, изучение, оценка и комплексное освоение попутных вод могут способствовать более рациональному освоению недр и охране окружающей природной среды от техногенного загрязнения.

Проблема изучения попутных вод *угольных месторождений* возникла сравнительно недавно и характеризуется быстро возрастающей детализацией направлений и масштабами исследований. Огромные массы попутных вод, извлекаемых на поверхность и сбрасываемых в речную сеть, вынуждали специалистов решать прежде всего две задачи данной проблемы — оценку токсичности этих вод и уровень воздействия на окружающую среду, а также возможность их использования в различных отраслях народного хозяйства. Исследования по токсичности шахтных вод и характеру загрязнения сосредоточены в ряде институтов Министерства угольной промышленности. Значительные работы проведены на месторождениях Европейской части СССР и Казахстана путем разового отбора общешахтных проб попутных вод и отчасти проб шлама, анализа их химического состава и оценки фактического водопритока в шахты. Применялись количественные химические и полуколичественные спектральные методы определения. Оценивались содержания основных макрокомпонентов, в частности, Ni, Co, Sn, Mo, Ti, Al, Fe, Mn, Zn, Bi, Pb, Be, Ag, Sr, Au, Ga, Ge, Sb и Ba.

И. Н. Баскаченко, С. Н. Золотарев, И. М. Соболев и другие исследователи изучали возможность использования не только пресных, но и слабоминерализованных попутных вод для орошения в аридной зоне СССР. Они обосновали возможность орошения земель шахтными водами с минерализацией до 4 г/л, что не вызывает засоления почв. Следует упомянуть, что объем таких вод составляет не менее 50 % от общего объема попутных вод угольных месторождений аридной зоны СССР. Ряд работ посвящен использованию попутных вод для водоснабжения (питьевого и технического) — это исследования М. С. Кельманского, касающиеся водоснабжения г. Кизела; М. И. Городинского, Л. А. Горбунова и других, обобщающие опыт использования шахтных вод в схемах водоснабжения угледобывающих и перерабатывающих предприятий.

Кроме того, проводятся исследования по гидрохимии угольных месторождений. Особое внимание уделено изучению условий формирования состава попутных вод и миграции элементов в подземных и попутных водах угольных бассейнов. Эти вопросы впервые изучались С. Д. Севриковой для условий Центрального и Северного Донбасса; А. А. Плескачевской, Г. А. Плевако, Г. М. Роговым и В. К. Поповым для условий Кузнецкого бассейна; Н. И. Кононенко для условий Кизеловского угольного бассейна. В своих работах они отметили, что попутные воды формируются вследствие смешения подземных вод, происходящего под влиянием рудничной атмосферы и при взаимодействии с горными породами; химический состав попутных вод изменяется пропорционально пути и

времени протекания по выработкам в результате выщелачивания и растворения пород, катионного обмена на глинистых составляющих, химического и биохимического окисления сульфидов; все процессы, активизирующие метаморфизацию подземных вод, ведут к увеличению минерализации попутных вод за счет роста концентрации SO_4, небольшому, как правило, уменьшению pH и обогащению вод такими элементами, как Co, Mo, Ni и Ti; значительное большинство попутных вод характеризуется pH 6—8, но в условиях разработки высокосернистых углей ($S_{общ} \geqslant 4\ \%$) быстро формируются кислые воды с pH 2—3.

М. И. Клещев, Г. Н. Панасенко, И. М. Черненко и другие провели исследования в направлении прогнозирования водопритока в горные выработки угольных шахт и макрокомпонентного состава попутных вод. Они, применяя корреляционный анализ, сделали попытку выявить степень и характер связи между различными компонентами состава попутных вод или связи между среднегодовыми водопритоками и горноэксплуатационными показателями разработки (глубиной и производительностью шахты). Однако в их работах не отражена природа (геохимическая, гидродинамическая и др.) этой связи.

В конце 70-х годов ВСЕГИНГЕО и ВГО «Союзуглегеология» Минуглепрома СССР начали комплексное изучение данной проблемы с целью: оценки возможности использования попутных вод в качестве гидроминерального сырья; оценки токсичности элементов в попутных водах; оценки использования попутных вод как дополнительных водных ресурсов в различных отраслях народного хозяйства. Исследования первого этапа проводились путем гидрохимического опробования всех угольных бассейнов СССР и применения количественных методов анализа состава вод на широкую группу элементов (50—60 элементов). Обобщение и анализ материалов разового опробования угольных месторождений и бассейнов СССР позволило: оценить макро- и микрокомпонентный состав попутных вод, формирующихся в различных геоструктурных и гидрогеологических условиях, наметить группу ценных элементов постоянно присутствующих в этих водах, и оценить водопритоки в угольные шахты бассейнов, выявить месторождения, в водах которых наблюдаются максимальные концентрации данной группы элементов при значительных водопритоках. Содержание 52 элементов в попутных водах приведено в табл. 26.

Попутные воды *рудных месторождений* (или рудничные воды) привлекают внимание очень давно. Еще в XVI—XVII вв. методом цементации извлекали медь из кислых рудничных вод сульфидных медноколчеданных, медно-полиметаллических и реже полиметаллических месторождений. До недавнего времени рассматривалась возможность извлечения из этих вод лишь меди и цинка, в меньшей степени — свинца, еще реже — мышьяка и некоторых других элементов. К настоящему времени значительно расширились представления о микрокомпонентном составе вод разведуемых и эксплуатируемых месторождений практически всех типов в разных

Таблица 26

Максимальные содержания химических элементов в водах (мг/л)

Элементы	Океан	Средний состав	Воды зоны гипергенеза				Минеральные воды		Подземные воды глубоких горизонтов		ПДК
			Рудные месторождения		Угольные месторождения						
			Кислые <6,5	Щелочные >7,5	Кислые <6,5	Щелочные >7,5	Углекислые	Азотные термальные	Термы областей современного вулканизма	Соленосных формаций	
Ag	$4 \cdot 10^{-5}$	$2{,}9 \cdot 10^{-4}$	126	0,060	0,058	0,0050	0,0007	0,0007	0,5	1	—
Al	0,01	0,279	13 106	1 000	294		74,2	3,3	5048	3000	—
As	0,003	0,00207	1 500	0,20	0,01	0,04	150,0	0,002	30,0	1,44	0,05
Au	$4 \cdot 10^{-6}$	$2{,}7 \cdot 10^{-5}$	0,0055	0,0012	0,0003	0,0005	$2 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$	0,0016	$4{,}9 \cdot 10^{-4}$	—
B	46	0,0418	1,7	5,0	1,25	5,0	1200	16	110	23 000	—
Ba	0,03	0,0196	0,6	0,100	1,17	26,31	62,4	—	0,13	370	0,1
Be	$6 \cdot 10^{-7}$	$2{,}7 \cdot 10^{-4}$	0,52	0,3	0,26	0,001	0,429	0,002	—	—	0,0002
Bi	$2 \cdot 10^{-5}$	—	0,72	0,0096	0,007	0,567	—	—	—	—	0,1
Br	65	0,183	125	44,2	8,1	434,8	66	105	7,8	17 470	—
Cd	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$	41	0,3	0,033	0,045	—	—	0,14	2,5	0,01
Ce	$5{,}2 \cdot 10^{-6}$	—	—	0,42	0,553	0,061	—	—	—	—	—
Co	$5 \cdot 10^{-4}$	$8{,}3 \cdot 10^{-4}$	3 600	0,100	6,61	0,042	0,002	—	0,070	—	0,1
Cr	$5 \cdot 10^{-5}$	0,0029	0,6	0,01	0,230	0,367	—	—	—	0,7	0,05
Cs	$5 \cdot 10^{-4}$	$2{,}8 \cdot 10^{-4}$	0,0120		$<0{,}01$	$<0{,}01$	3,3	0,171	1,8	25,0	—
Cu	0,003	0,00558	45 633	1,1	0,78	0,177	0,650	0,025	51,0	32,0	0,5
F	1,3	0,45	8,0	15 000	2,8	5,0	8,1	26	50,4	25	1,5
Fe	0,01	0,547	47 030	0,49	1270	—	165	0,8	1778	3 780	0,1
Ga	$3 \cdot 10^{-5}$	$6{,}8 \cdot 10^{-4}$	0,040	—	0,053	0,174	—	—	—	—	—
Ge	$7 \cdot 10^{-5}$	—	0,100	0,005	0,0012	0,015	0,200	0,020	0,027	—	—
Hg	$3 \cdot 10^{-5}$	$9{,}1 \cdot 10^{-4}$	0,070	0,08	—	0,053	—	0,169	0,050	—	0,0005

In	<0,02	—	—	—	1,47
I	0,06	0,0161	2,0	4,3	1,1
La	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	—	—	0,213	0,368
Li	0,17	0,014	0,300	18,6	0,5
Mn	0,002	0,0494	1 690	1,4	7,14
Mo	0,01	0,00201	0,7	0,07	0,032
Nb	$1 \cdot 10^{-5}$	—	—	0,04	—
Ni	0,002	0,00331	30 000	0,24	9,55
Pb	$3 \cdot 10^{-5}$	0,00221	1 377	0,2	0,022
Rb	0,12	0,00222	0,14	6,6	0,02
Re	—	—	—	0,029	—
Sb	$5 \cdot 10^{-4}$	0,00153	2,4	0,025	—
Sc	$4 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	0,248
Se	0,004	$<9{,}1 \cdot 10^{-4}$	0,3	0,05	—
Si	3	8	90	13 000	—
Sn	$8 \cdot 10^{-4}$	$4{,}1 \cdot 10^{-4}$	0,3	—	0,011
Sr	8	0,185	1,9	—	25,4
Ta	—	—	—	—	—
Ti	0,001	0,0107	23	2	0,91
Te	$1 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	0,002
V	0,002	0,00155	0,200	0,0005	0,486
W	$1 \cdot 10^{-4}$	—	0,07	0,3	—
U	$3 \cdot 10^{-4}$	—	—	0,027	0,410
Yb	$2 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	0,053
Zn	0,01	0,034	50 300	18,0	5,60
Zr	—	0,0013	0,5	—	0,168
Hf	—	—	—	—	0,130
Sm	—	—	—	—	0,237
Eu	—	—	—	—	0,087
Tb	—	—	—	—	0,029
Lu	—	—	—	—	0,012
Nd	—	—	—	—	0,100

0,023	—	—	—		
4,2	13,4	22	2,4	1 400	—
0,023	—	—	—	—	—
4,0	100,8	18,8	12,2	692	—
1,34	44,3	0,3	30,0	2 000	0,05
0,661	0,061	0,5	0,08	0,03	0,25
—	—	—	—	0,04	0,01
0,165	0,005	0,04	0,1	2,3	0,1
0,041	1,8	0,036	32	125	0,03
0,016	10	0,3	2,1	960	—
0,0006	—	—	—	—	—
0,027	—	—	0,7	—	0,05
0,054	—	—	—	—	—
0,010	0,008	0,006	—	0,005	0,001
—	78	58	376	1 663	—
0,052	—	—	0,036	—	—
212,0	80	5,5	10,3	11 162	7,0
—	—	—	—	0,038	—
4,67	2,6	—	—	—	0,1
0,0105	—	—	—	—	0,0001
0,311	6	—	0,64	—	0,1
0,001	0,0175	0,6	0,072	—	0,05
0,76	—	—	—	—	—
0,059	—	—	—	—	—
0,91	0,93	0,52	150	630	1,0
0,717	0,15	—	—	—	—
0,010	—	—	—	—	—
0,015	—	—	—	—	—
0,004	—	—	—	—	—
0,006	—	—	—	—	—
0,002	—	—	—	—	—
0,118	—	—	—	—	—

природных обстановках. В рудничных водах количественными методами установлено содержание около 50 микрокомпонентов (см. табл. 26). Однако изучены рудничные воды неравномерно как по типам месторождений, так и по комплексу определяемых элементов. Например, при наибольшей изученности состава попутных вод сульфидных медных и свинцово-цинковых месторождений в них традиционно определяются лишь медь, цинк и свинец. Хотя известно, что руды этих месторождений в промышленных количествах обычно содержат (кроме извлекаемых элементов) до 8 и более редких и рассеянных элементов, которые фиксируются и в попутных водах.

Крайне ограничены сведения об изменении макро- и микрокомпонентного состава рудничных вод в связи с изменениями гидрогеологических и горнотехнических условий, режима водоотбора и т. д. Пока нет достаточно надежных материалов для оценки стабильности содержания микроэлементов и о факторах, влияющих на изменение состава этих вод. Это не позволяет прогнозировать состав попутных вод, формирующихся при разработке месторождений. Достоверность прогноза значительно снижается еще из-за того, что гидрогеохимические и гидродинамические наблюдения проводятся, как правило, разобщенно, не по единой программе и разными методами на стадиях разведки и эксплуатации месторождения. По сравнению с геохимией гидродинамика рудничных вод изучена лучше, но недостаточно.

Попутные воды рудных месторождений в зависимости от их химического состава и степени очистки от вредных примесей (токсичные элементы, нефтепродукты, грубодисперсные частицы, повышенная минерализация) могут использоваться для бытового и технического водоснабжения, мелиорации и т. д.

Глава 3

РАЙОНИРОВАНИЕ И ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ПРИНЦИПЫ И СХЕМА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ СССР

Районирование подземных вод является естественной гидрогеологической основой для изучения региональных закономерностей их распространения. Выделение обособленных районов необходимо также для выбора правильного методического подхода к региональной оценке эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов таких вод и обоснованию перспектив их практического использования. Целесообразность районирования определяется, в частности, существенным отличием условий распространения и залегания минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод от условий, свойственных пресным, солоноватым и соленым.

Подземные минерализованные воды и рассолы широко развиты на территории СССР и приурочены, как правило, к глубоким частям крупных артезианских бассейнов. Бассейны эти в структурно-тектоническом отношении соответствуют впадинам, выделяемым в рельефе складчатого основания древних докембрийских и эпигерцинских платформ, крупных предгорных и межгорных впадин. Масштабы распространения, химический состав глубоких подземных вод и характер изменения в них концентраций рассеянных и редких элементов различны в разных районах и определяются общей гидрогеологической обстановкой, обусловленной геологической историей региона и, в свою очередь, обусловливающей особенности и направление подземного стока.

Являясь частью природных вод артезианских бассейнов, в той или иной степени связанных с другими типами подземных вод, глубокие воды требуют изучения и оценки в границах естественных гидрогеологических регионов. При выделении и изучении районов распространения подземных минеральных, термальных и промышленных вод целесообразно использовать разработанные к настоящему времени принципы и схему общего гидрогеологического районирования территории СССР, а также учитывать их специфические особенности (см. гл. 2).

Теоретические основы общего гидрогеологического районирования были заложены в 30-х годах текущего столетия. На основе анализа обширного фактического материала установлено, что гидрогеохимическая зональность подземных вод находится в тесной связи с возрастом, историей развития и строением крупных геологических структур. Поэтому за основу при общем гидрогеологическом районировании были приняты геоструктурные подразделения, в пределах которых наблюдаются единые формы гидрогеологической зональности и закономерности распространения и региональной динамики подземных вод. Принципы гидрогеологического районирования на геологоструктурной и гидрогеохимической основе получили развитие в трудах Г. Н. Каменского, Н. К. Игнатовича, Н. И. Толстихина и И. К. Зайцева. Следует отметить, что более поздние исследования, выполненные с использованием новых материалов о геологотектоническом строении и гидрогеологии территории СССР, в том числе глубоких зон артезианских бассейнов, подтвердили справедливость этих принципов.

Развитие представлений о динамике подземных вод глубоких горизонтов позволило при гидрогеологическом районировании принимать во внимание также общие условия залегания, создания напора, движения воды, их разгрузки. Принимая на этой основе за единицу районирования «природные водонапорные системы», А. М. Овчинников отмечал, что не всегда по условиям распространения и движения подземных вод представляется возможным охарактеризовать гидрогеологические районы, используя классическую схему артезианских бассейнов. Большинство гидрогеологических районов являются асимметричными; кроме того, термин «об-

ласть питания» не всегда и недостаточно точно характеризует условия создания напора и формирования подземных вод.

Учитывая это, А. М. Овчинников выделил шесть типов водонапорных систем:

— крупные бассейны платформенных областей;

— средние артезианские бассейны на платформах, в межгорных котловинах и в предгорных краевых прогибах;

— малые артезианские бассейны, часто «наложенные» на более крупные бассейны;

— водонапорные системы трещинных вод в массивах кристаллических и метаморфических пород;

— системы сопряженных бассейнов горных сооружений;

— бассейны и потоки грунтовых вод субартезианского типа, наложенные на водонапорные системы различных типов.

Подземные промышленные воды широко распространены в пределах двух первых водонапорных систем. Принимая это во внимание, а также учитывая, что глубокие подземные воды характеризуются древним формированием, малой подвижностью и своеобразными условиями распространения, в дальнейшем изложении мы используем термин «бассейн».

Представления о природных водонапорных системах получили дальнейшее развитие в трудах А. А. Карцева и его последователей. По генезису и механизму формирования подземных вод ими были выделены системы элизионные и инфильтрационные. А. А. Карцев отмечает сложность подобного подразделения водонапорных систем, имея в виду возможные взаимопереходы одной из них в другую на различных этапах развития бассейнов и возможное сложное сочетание той и другой системы в одном и том же бассейне.

В настоящей работе в качестве основы принята общая схема гидрогеологического районирования территории СССР, выполненная В. И. Духаниной, А. И. Ефимовым, М. Р. Никитиным, Н. В. Роговской и др., с учетом ранее разработанной Г. Н. Каменским, Н. И. Толстихиным, И. К. Зайцевым [9]. В принятую за основу схему внесены частичные дополнения, обусловленные новыми представлениями о геологическом возрасте и геолого-тектоническом строении отдельных районов территории СССР. Вместе с тем, использованы и данные, характеризующие гидрогеохимические закономерности и, что очень важно, гидродинамические особенности артезианских бассейнов. Эти данные получены главным образом при направленном изучении ресурсов глубоких подземных промышленных вод (С. С. Бондаренко, Л. С. Балашов, Г. Я. Богданов, В. В. Перцовский, А. Т. Печерин, П. И. Трофимук, Е. В. Пиннекер), а также из опыта специального районирования минеральных (А. М. Овчинников, В. В. Иванов, Л. А. Яроцкий, Г. С. Вартанян, С. С. Бондаренко и др.), термальных (Б. Ф. Маврицкий, К. Ф. Богородицкий, А. А. Шпак и др.) и собственно промышленных вод (Н. А. Плотников, И. К. Зайцев, С. С. Бондаренко и др.).

С учетом изложенных замечаний при гидрогеологическом районировании подземных промышленных вод предлагаются и используются следующие принципы выделения и объединения площадей их распространения.

В основу районирования подземных промышленных вод, как указано выше, положен геоструктурный признак; в соответствии с этим главными элементами районирования являются крупные гидрогеологические области (платформенные артезианские и горноскладчатые), при выделении которых принимаются во внимание основные геоструктурные элементы земной коры. В качестве такого рода гидрогеологических структур следует назвать древние и молодые платформы и горноскладчатые сооружения.

Крупные гидрогеологические структуры, характеризующиеся общностью закономерностей распространения подземных промышленных вод, по Н. А. Плотникову [16], объединяются в *провинции подземных промышленных вод*. В пределах отдельных частей таких провинций в связи с различными геолого-структурными условиями и гидрогеологическими особенностями процессы формирования ресурсов и химического состава подземных вод могут быть различными и в аспекте геологической истории развития гидрогеологических структур, и в настоящее время. Поэтому промышленные воды в пределах провинций могут иметь сходные условия и закономерности распространения в одних районах и отсутствовать в других. Иными словами, подземные промышленные воды в пределах провинций могут не иметь (и в большинстве случаев не имеют) выдержанного распространения.

В некоторых крупных гидрогеологических областях промышленные воды в принятом понимании полностью отсутствуют, и такие области не могут квалифицироваться как провинции промышленных вод. По имеющимся данным, бесперспективными или мало перспективными применительно к промышленным водам являются области мезозойской складчатости северо-востока СССР, каледонского и герцинского складчатого обрамления Западной и Восточной Сибири; ограниченное распространение (в отдельных межгорных впадинах) имеют промышленные воды в областях палеозойской складчатости Средней Азии и Казахстана.

В пределах провинций имеются территории (гидрогеологические структуры второго порядка), выделяемые в качестве *районов* (в частном случае — бассейнов) *промышленных вод*. Каждый такой район (бассейн) характеризуется особенностями геологической истории развития и условиями формирования подземных вод. В отдельных районах провинций собственно промышленные воды могут отсутствовать совсем или иметь весьма ограниченное распространение.

Сопоставление гидрогеологических условий различных провинций показало, что они отличаются: 1) геологическим возрастом и структурно-тектоническим строением, а также стратиграфической приуроченностью вмещающих промышленные воды пород; 2) особенностями литолого-фациального состава и условиями формиро-

вания толщ этих пород; 3) характером (минерализацией, химическим составом) подземных вод; 4) величинами концентраций в воде полезных компонентов и их сочетанием; 5) условиями залегания и распространения промышленных вод. Необходимо подчеркнуть, что эти различия и особенности также определяют своеобразие методического подхода к оценке ресурсов и перспектив использования этих вод. Схема распространения и районирования подземных промышленных вод на территории СССР представлена на рис. 1. В соответствии с представлениями Н. И. Толстихина, А. И. Дзенс-Литовского, А. М. Овчинникова, В. В. Иванова, Л. А. Яроцкого и Г. С. Вартаняна провинции минеральных вод объединяют обширные территории, характеризующиеся однотипностью химического состава и общим единством процессов образования в их пределах основных типов минеральных вод.

Исследования, проведенные в последние десятилетия ВСЕГИНГЕО, позволили обосновать дальнейшее развитие сложившихся представлений на специфику распространения отдельных типов минеральных вод, их генезис и формирование ресурсов, что и явилось основой для внесения изменений в ранее существующую схему районирования.

Обобщение огромного количества геологических и гидрогеологических материалов, оценка результатов глубокого бурения и современной информации о специфике важнейших геологических процессов явились основой для выделения трех провинций минеральных вод: 1) метановых, азотно-метановых, азотных вод различной (преимущественно высокой) минерализации и температур; 2) углекислых вод различного ионного состава и температур; 3) азотных маломинерализованных щелочных терм. Такое районирование, в отличие от ранее принятого, исключает провинции радоновых, кислородно-азотных вод, массивов кислых кристаллических пород. Последнее обосновывается зональным характером обогащения вод радоном, проявляющимся практически во всех провинциях минеральных вод.

На основе общего гидрогеологического районирования разработана классификация основных геологических структур СССР по геотермическим условиям (табл. 27, рис. 2). В пределах областей и провинций как промышленных, так и минеральных и термальных вод выделяются районы (в частном случае бассейны) — гидрогеологические структуры второго порядка. Каждый такой район характеризуется своими особенностями геологической истории развития и условиями формирования газового, химического состава подземных вод, их температурного режима.

В соответствии с приведенными выше определениями, провинции минеральных вод являются наиболее крупными подразделениями. В контурах некоторых из них (метановых, азотно-метановых, азотных, углекислых) промышленные воды занимают лишь наиболее благоприятные для существенного обогащения подземные воды редкими и рассеянными элементами регионы. Основные ресурсы промышленных вод аккумулируют пластовые системы ар-

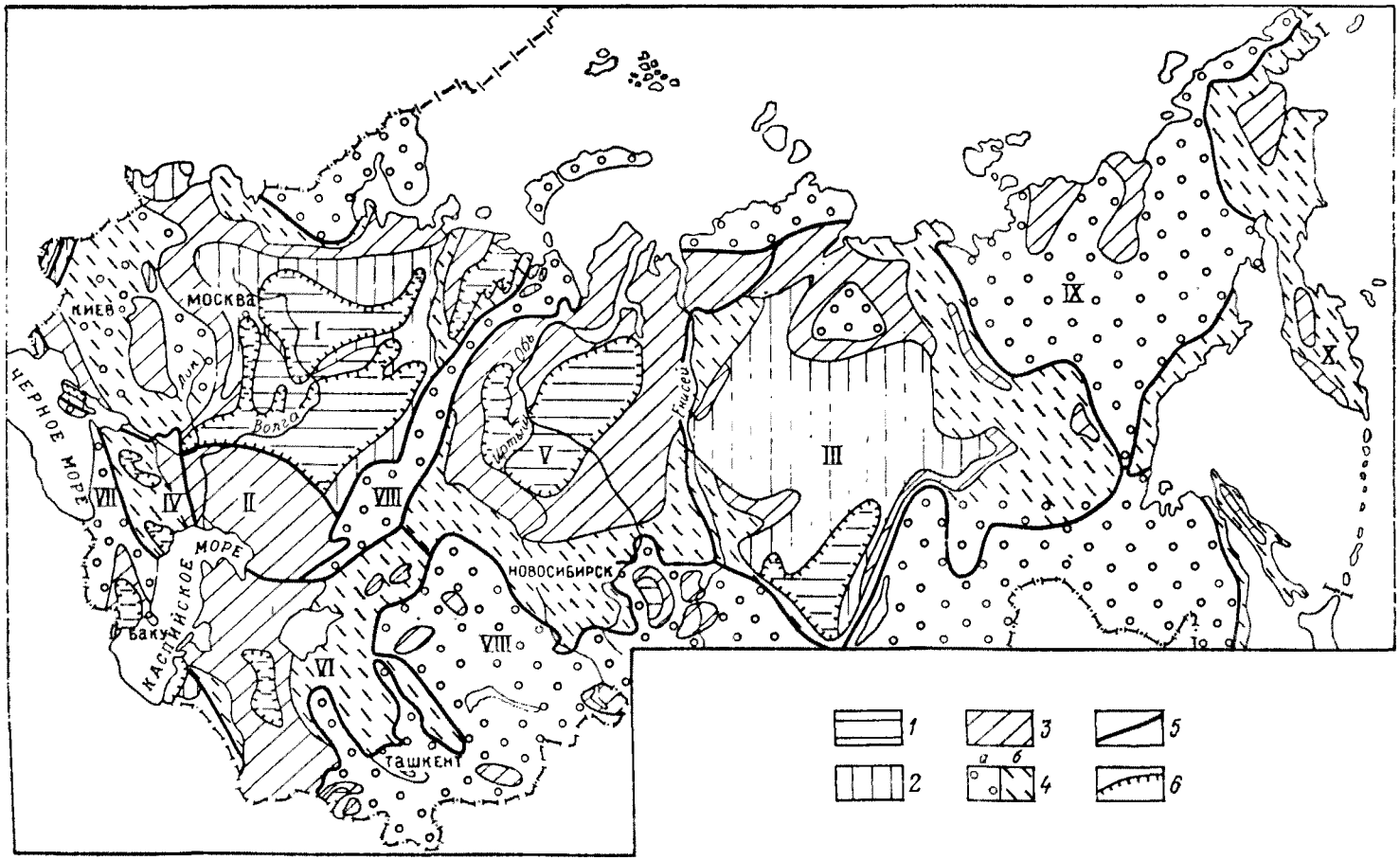


Рис. 1. Схематическая карта распространения и районирования промышленных подземных вод территории СССР.

Провинции древних (докембрийских) платформенных областей: I — Русская, II — Прикаспийская, III — Сибирская; провинции эпипалеозойских платформенных областей: IV — Скифская, V — Западно-Сибирская, VI — Туранская; провинции гидрогеологических складчатых областей: VII — альпийской, VIII — герцинской, IX — мезозойской, X — кайнозойской. Районы подземных промышленных вод (йодных, бромных и йодо-бромных): *1* — весьма перспективные, *2* — перспективные, *3* — малоперспективные, *4* — неперспективные горноскладчатые области и щиты (*а*) и платформы (*б*); границы: *5* — провинций, *6* — месторождений промышленных вод

Таблица 27

Классификация гидрогеологических структур СССР по геотермическим показателям. *По Б. Ф. Маврицкому*

Тепловой режим	Геотермический градиент, °С/100 м	Плотность теплового потока, 0,24 кВт/м²	Гидрогеологические области и районы	Характер теплового поля	Температура разреза (в °С) с учетом температуры нейтрального слоя при глубине, м		Примеры структур
					1000	2000	
Низкий	<1	<1	Гидрогеологические районы щитов и древних складчатых массивов, не испытавших значительной неотектонической активизации	Спокойное, с низким темпом нарастания температуры с глубиной	0—10	10—20	Алданский, Анабарский, Балтийский, Украинский, Кокчетавский гидрогеологические массивы
Умеренный	1—2	1—1,2	Древние артезианские платформенные области, артезианские бассейны межгорных впадин и предгорных прогибов, выполненных палеозойскими отложениями	Спокойное, с умеренным темпом нарастания температуры с глубиной	0—20	20—40	Восточно-Европейская и Сибирская платформенные области, артезианская система Предуральского предгорного прогиба, артезианские бассейны межгорных впадин Саянского типа — Кузнецкой, Минусинской, Тувинской

			Гидрогеологические районы складчатых областей (от байкальской до мезозойской складчатости), не испытавших неотектонической активизации	Относительно спокойное	0—20	20—40	Складчатые системы Урала, Таймыра, область Центрально-Казахской складчатой системы
Повышенный	2—3	1,2—1,5	Артезианские области эпипалеозойских плит, артезианские бассейны межгорных впадин, прогибов, выполненных мезо-кайнозойскими отложениями	Относительно спокойное, с повышенным темпом нарастания температуры с глубиной	5—30	30—60, реже 70	Западно-Сибирская, Скифская и Туранская артезианские платформенные области, артезианские бассейны межгорных впадин Тянь-Шанского, Кавказского и Байкальского типов предгорных прогибов, артезианские системы Предкавказского и Предкопетдагского прогибов
			Гидрогеологические районы альпийской складчатости с системой разрывных нарушений	Контрастное (от умеренного до повышенного), обусловленное гидрогеологическими аномалиями	30—70	40—70	Гидрогеологические складчатые системы Карпат, Кавказа, Копет-Дага

Продолжение табл. 27

Тепловой режим	Геотермический градиент, °С/100 м	Плотность теплового потока, 0,24 кВт/м²	Гидрогеологические области и районы	Характер теплового поля	Температура разреза (в °С) с учетом температуры нейтрального слоя при глубине, м		Примеры структур
					1000	2000	
Высокий	>3	>1,5	Отдельные районы и участки артезианских областей эпипалеозойских плит, межгорных впадин, прогибов, выполненных мезо-кайнозойскими отложениями, в пределах которых отмечены тектонические нарушения, связанные с неотектоническим этапом активизации	Спокойное, на отдельных участках с внедрением в верхние части водонапорных флюидов из глубоких частей этих систем	20—60	50—100	Сибирская, Туранская, Западно-Сибирская артезианские платформенные области, артезианские бассейны впадин: Куринской, Рионской, Иссык-Кульской, Ферганской, Таджикской депрессии и т. д. Гидрогеологические складчатые системы Памира, Тянь-Шаня, Байкала и др.
			Участки гидрогеологических складчатых районов, испытывавших воздействие неотектоники с образованием новых тектонических нарушений или раскрытием (обновлением) старых	Контрастное (от умеренного до высокого), обусловленное частыми гидрогеотермическими аномалиями	0—40	40—90	
			Участки тектонических нарушений в гидрогеологических районах современного вулканизма с особо ярким проявлением термоаномалий	То же	Вне влияния вулканических очагов до 100, в зоне влияния вулканических очагов 100—300		Гидрогеологические складчатые зоны Камчатки и Курильских островов

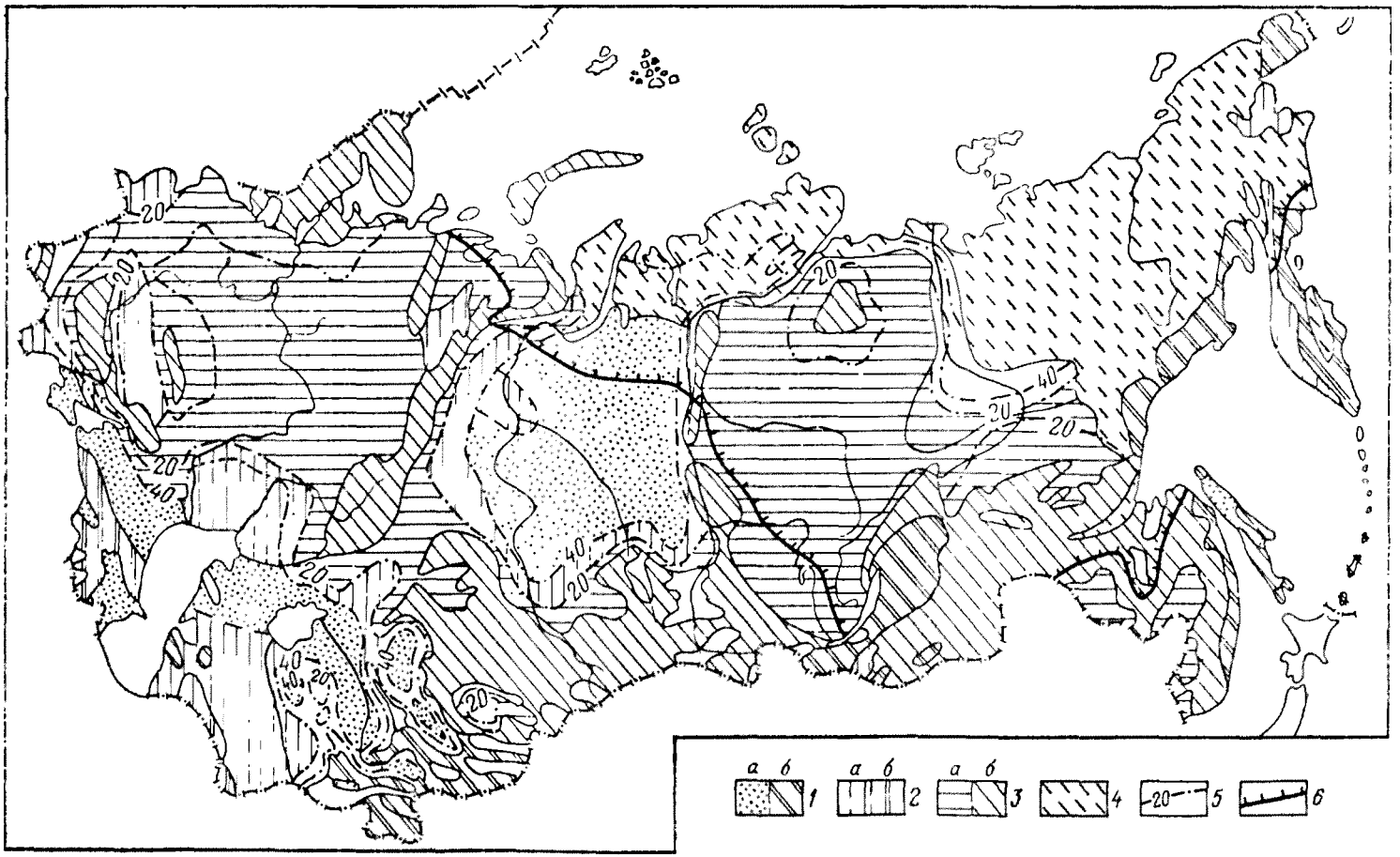


Рис. 2. Схематическая карта термальных вод СССР. По Б. Ф. Маврицкому, Г. К. Антоненко, Т. Б. Гребенщиковой, Н. С. Отман, А. А. Шпаку.

Районы развития термальных вод пластового (*а*) и трещинного (*б*) типа: *1* — перспективные, *2* — с ограниченными перспективами, *3* — бесперспективные; *4* — не изученные или слабоизученные; границы: *5* — изотермы, °С, *6* — южная граница многолетнемерзлых пород

тезианских бассейнов платформ, а также межгорных и предгорных прогибов. Подземные воды этих структур представляют в свою очередь обширную по своим размерам (занимающую большую часть территории СССР) провинцию метановых, азотно-метановых, азотных вод различной минерализации и температур. Разнообразные бальнеологические группы вод, представляющих данную провинцию (без специфических компонентов и свойств, сульфидные, бромные, йодные и йодо-бромные и др.) широко используются на курортах, заводах розлива, в бальнеолечебницах. В данном случае проявляется вертикальная гидрохимическая зональность. В верхних горизонтах пород (зона активного и замедленного водообмена) распространены азотные (инфильтрационного генезиса) воды разнообразного ионного состава (гидрокарбонатные, сульфатные) с невысокой минерализацией. В погруженных частях таких систем (зона застойного и весьма застойного режима) на глубинах от сотен метров до 7 км и более господствуют метановые, азотно-метановые высокоминерализованные воды и рассолы с широким диапазоном изменений величин минерализации (50—700 г/л), преобладанием хлоридов среди анионов и значительными вариациями в катионном составе (Cl-Na, Cl-Ca-Na, Cl-Na-Ca, Cl-Mg-Ca, Cl-Ca-Mg, Cl-Na-Mg). Эти воды являются основными аккумуляторами редких и рассеянных элементов в подземной гидросфере.

Установлена связь основных горизонтов, аккумулирующих промышленные воды с продуктивными на нефть и газ толщами, а также с районами существенного обогащения (сотни и тысячи миллиграммов на литр) подземных вод сероводородом (специфическая группа минеральных сероводородных вод). Изучение распределения редких элементов в подземных водах артезианских прогибов показало, что масштаб их распространения, представительность и концентраций отдельных элементов, химический состав аккумулирующих их вод в значительной мере определяются возрастом этих структур. Последнее обосновывает правомерность выделения провинций промышленных вод, древних (докембрийских) и эпипалеозойских платформенных областей.

Характерная для погруженных частей большого числа артезианских бассейнов древних платформ (провинции Русской, Сибирской и Прикаспийской областей) обстановка длительного (около 300 млн. лет) взаимодействия воды и породы при широком распространении хемогенных образований в разрезе определяет высокую, а в отдельных регионах (провинция Сибирской платформы) и уникальную по величине минерализацию (до 700 г/л) промышленных рассолов, существенную метаморфизацию их состава (распространение Cl-Ca-Na и Cl-Ca-Mg вод при $HCO_3 > SO_4$) и накопление редких и рассеянных элементов. Последние характеризуются высокими, а иногда и чрезвычайно высокими концентрациями: бром — до 9000 г/м^3, стронций — до 8000 г/м^3, бор — до 100—150 г/м^3, редкие металлы — до 250 г/м^3.

Наибольший интерес представляют сверхкрепкие ($M > 350$ г/л) и весьма крепкие (М от 270 до 350 г/л) рассолы, находящиеся в наиболее погруженных частях древних платформенных областей. Их распространение практически совпадает с границами солеродных бассейнов (Ангаро-Ленского, Тунгусского, Припятского, Волго-Камского). За пределами распространения этих вод в основном развиты крепкие (М от 140 до 270 г/л) рассолы с существенно ограниченным комплексом редких и рассеянных элементов и более низкими концентрациями. Для артезианских бассейнов древних платформ из анионогенных элементов наиболее характерны бром и стронций. Они встречаются в комплексе с редкими металлами.

Геологические условия формирования химического состава вод глубоких структурных горизонтов в пределах провинций эпипалеозойских платформенных областей определяют существенно более низкие минерализации промышленных вод, меньшую степень общей метаморфизованности их состава (преимущественное распространение Cl-Ca-Na рассолов с $HCO_3 > SO_4$ и $HCO_3 < SO_4$), а также существенно меньшую обогащенность их бромом.

Для провинций эпипалеозойских платформенных областей характерно наличие бора и йода.

Тектоническая подвижность регионов, а в ряде случаев незавершенность литогенетических преобразований и метаморфических превращений пород и геотермическая напряженность создают достаточно благоприятную геохимическую обстановку (поступление тепла и углекислоты) для активизации процессов, способствующих обогащению вод редкими металлами, йодом, бором.

Закономерно, что за пределами солеродных бассейнов рассматриваемых провинций наиболее характерные по составу редких элементов и их концентрации воды формируются в наиболее подвижных и тектонически напряженных бассейнах.

Возраст артезианских прогибов, специфика и особенности их геологического развития, неотектоническая активизация признаны определяющими факторами и в формировании специфики их геотермического режима. По геотермическим условиям и интенсивности геотемпературных полей водонапорные системы пластового типа подразделяются на два вида [34]: а) системы древних платформ и сочлененных с ними краевых прогибов, выполненных палеозойскими породами, в основании осадочного чехла которых максимальные температуры достигают 50—75 °С, реже 100 °С; б) системы эпипалеозойских плит и сочлененных с ними краевых прогибов выполненных мезо-кайнозойскими породами, где в основании осадочного чехла максимальные температуры достигают 100—200 °С, реже более.

В ходе осуществления региональной оценки прогнозных запасов йодо-бромных, минеральных и термальных вод четко проявилась определяющая роль возраста платформенных артезианских прогибов и в формировании фильтрационных особенностей пород глубоких структурных горизонтов. В общем плане фильтрацион-

ные свойства глубокозалегающих палеозойских пород докембрийских платформ во много раз ниже, чем у мезо-кайнозойских пород эпипалеозойских плит. Это объясняется значительно более глубокими катагенетическими изменениями пород на древних платформах, чем на более молодых плитах. Сказанное выше имеет принципиальное значение для оценки перспектив использования промышленных, минеральных и термальных вод.

В пределах разновозрастных регионов горноскладчатых областей пластовые водонапорные системы имеют существенно более ограниченное распространение. Такие системы, также как и артезианские бассейны платформ, имеют мощный чехол осадочных отложений, но значительно меньшие размеры и более сложное строение. Последнее обусловлено изменчивостью литологического состава и тектонической нарушенностью пород. В региональном плане эти системы представляют собой ограниченные звенья, которые примыкают к обширной, получившей региональное распространение в пределах платформ площади метановых, азотно-метановых и азотных вод с различными минерализациями и температурами. Водонапорные системы горноскладчатых областей в зависимости от возраста имеют различную температуру: в основании осадочного чехла палеозоя температура достигает 50—75 °С; в основании осадочного чехла мезо-кайнозоя 100—200 °С, а в ряде случаев и более. При наличии благоприятных коллекторов в некоторых впадинах (Приморская, Куринская, Ферганская, Иссык-Кульская, Тункинская) аккумулируются значительные ресурсы термальных вод. Распространение промышленных вод в межгорных артезианских бассейнах приурочено к наиболее контрастным по своим амплитудам прогибания структурам (Курино-Апшеронский, Западно-Туркменский, Южно-Таджикский бассейны).

Накопление мощных (до 20 км) осадочных толщ в неоген-четвертичное время определило широкий размах активизации метаморфических процессов как в осадочном чехле (интенсивное диагенетическое уплотнение), так и в породах фундамента. Одним из выражений таких процессов является, по мнению некоторых исследователей, грязевой вулканизм. За пределами солеродных бассейнов (Южно-Таджикская депрессия) промышленные воды межгорных бассейнов представлены в основном весьма слабыми рассолами, преимущественно гидрокарбонатно-хлоридного-натриевого, сульфатно-хлоридно-кальциевого состава ($HCO_3 > SO_4$), значительно обогащенных йодом и бором.

В пределах горноскладчатых сооружений выделяются две крупные провинции минеральных вод: углекислых различного ионного состава и температур; азотных маломинерализованных щелочных терм. Эти воды имеют большое курортологическое значение. На базе эксплуатации углекислых вод и азотных терм названных провинций функционируют крупные курорты и в нашей стране, и за рубежом.

В контурах горноскладчатых сооружений провинция азотных маломинерализованных терм охватывает значительные территории

юга и востока СССР (Тянь-Шань, Алтай, Прибайкалье, Охотское побережье, и другие). Формирование наиболее типичных для этой провинции очаговых проявлений трещинно-жильных маломинерализованных щелочных терм связано с интенсивной тектонической дифференциацией верхних частей разреза в ходе существенной активизации неотектонических перемещений и проникновением на различные глубины инфильтрационных вод. При разгрузке углекислых и азотных вод в пластовые системы (межгорных и наложенных впадин) формируются пластовые скопления этих вод. Их пространственное положение контролируется наличием флюидопроводящих зон разломов (дренажных систем). Характер и степень обогащения азотных маломинерализованных терм редкими и рассеянными элементами определяет бесперспективность их использования в качестве промышленных вод. Таким образом, основные районы распространения азотных терм находятся вне контуров развития промышленных вод.

Провинция углекислых вод охватывает крупные разновозрастные регионы (Карпаты, Восточные Саяны, Забайкалье, Большой и Малый Кавказ, Сихотэ-Алинь, Камчатка). Общим для этой провинции является обогащение подземных вод углекислым газом, глубинная генерация которого происходит в результате активизации различных метаморфических процессов в зонах глубинных разломов. Специфическими формами проявления таких процессов характеризуются районы современного и четвертичного вулканизма. Последнее отражается и в составе типичных для этих районов вод. Азотно-углекислые высокотемпературные воды формируются только в районах проявления современного вулканизма.

Выявленные в последние десятилетия повышенные содержания редких металлов и бора в углекислых термах таких областей альпийской складчатости, как Камчатка, Карпаты, Кавказ, Памир, определяют возможность выделения в них отдельных провинций промышленных вод. Последние представляют лишь ограниченные структуры в существенно более обширных контурах проявления углекислых вод. Геологическая обстановка формирования промышленных вод в контурах перечисленных регионов значительно отличается от существующих в артезианских бассейнах. Для них характерны высокие значения отношений концентраций редких элементов к минерализации.

Крайне локализованное распространение обогащенных редкими и рассеянными элементами подземных вод в контурах отдельных положительных структур горноскладчатых областей ограничивает их расходы, определяя в целом их незначительную роль в общем балансе ресурсов промышленных вод страны.

По интенсивности геотемпературных полей водонапорные системы трещинно-жильного, трещинного и пластово-трещинного типа разделяются на системы районов современного вулканизма с температурами термальных вод до 300 °С и более, и системы вне пределов современного вулканизма с температурами термальных вод до 100 °С. В первых и сосредоточены наиболее мощные при-

родные гидротермальные системы, ресурсы которых уже частично осваиваются действующими геоТЭС.

Сопоставление основных показателей, характеризующих промышленные, минеральные и термальные воды отдельных областей, провинций и районов, показало их различия, обусловленные: приуроченностью к разнотипным и разновозрастным структурам; условиями их залегания и масштабами проявления; спецификой литолого-фациального состава водовмещающих толщ; закономерностями изменения фильтрационных свойств как водовмещающих, так и водоупорных толщ; ролью разломной тектоники в обогащении вод полезными компонентами и свойствами; уровнем концентрации полезных компонентов, и спецификой химического и газового состава вод и температур. Необходимо подчеркнуть, что именно эти различия определяют своеобразие методического подхода к оценке ресурсов и перспектив использования минеральных, термальных и промышленных вод. Провинции и районы промышленных, минеральных и термальных подземных вод на территории СССР приведены в табл. 28 и 29.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Изучение глубоких подземных вод и рассолов, основанное на анализе и обобщении огромного фактического материала, позволило установить ряд важных в теоретическом и практическом отношении закономерностей общего гидрогеохимического характера, а также закономерностей распространения в подземных водах рассеянных и редких элементов, представляющих интерес с точки зрения их промышленного извлечения. В изучение химического состава подземных вод, формирование представлений о гидрогеохимической зональности артезианских бассейнов и путях накопления в них микроэлементов большой вклад внесли Е. А. Басков, Л. С. Балашов, Г. А. Голева и другие исследователи. В систематизированном виде накопленный материал по подземным водам и рассолам СССР нашел свое отражение на региональных гидрогеохимических картах, картах промышленных, минеральных и термальных вод.

В горноскладчатых и вулканических областях СССР, как отмечалось выше, выделяются две наиболее крупные провинции минеральных вод: азотных и углекислых (рис. 3). Эти провинции характеризуются развитием вод различной минерализации и температуры. В большинстве случаев в их распространении намечается определенная зональность: от углекислых вод центральных площадей развития через азотные к азотно-метановым водам периферии [7]. Более подробно такие закономерности охарактеризованы в работах Г. С. Вартаняна, М. И. Врублевского, Г. А. Голевой, В. В. Иванова, С. Р. Крайнова, И. Я. Пантелеева, Н. И. Толстихина и других исследователей. В данном разделе приведены лишь краткие сведения о металлоносности гидротерм (табл. 30).

Области и районы распространения минеральных вод

Провинции	Область	Район
Хлоридных, натриевых (кальцевых) преимущественно метановых азотно-метановых и азотных вод	Скифская	Западно-Крымский, Азово-Кубанский, Восточно-Предкавказский
	Туранская	Устюртский, Тургайский, Центрально-Каспийский, Амударьинский
	Западно-Сибирская	Западно-Сибирский
	Восточно-Европейская	Прибалтийский, Среднерусский, Восточнорусский, Днепрово-Донецкий, Причерноморский, Каспийский
	Большеземельская	Печорский
	Восточно-Сибирская	Ангаро-Ленский, Якутский, Тунгусский, Хатангский, Оленекский, Коктуйский
	Карпатская	Предкарпатский
	Кавказская	Прикуринский
	Копетдаг-Большебалханская	Западно-Туркменский, Предкопетдагский
	Верхояно-Чукотская	Усть-Калымский, Тахстахский
Углекислых вод разнообразного ионного состава	Карпатская	Карпатский
	Кавказская	Предкавказский, Большекавказский, Малокавказский
	Джунгаро-Тянь-Шаньско-Памирская	Памирский, Тянь-Шаньский
	Камчатско-Курильская	Камчатский, Курильский
	Сахалинская	—
	Саяно-Алтайская	Саяно-Алтайский, Кузнецкий
	Восточно-Сибирская	—
Азотных терм	Туранская	Сырдарьинский, Бухаро-Каршинский
	Кавказская	Большекавказский, Малокавказский
	Джунгаро-Тянь-Шаньско-Памирская	Памирский, Джунгарский, Восточно-Тянь-Шаньский, Западно-Тянь-Шаньский
	Саяно-Алтайская	Саяно-Алтайский, Рудно-Алтайский
	Восточно-Сибирская	—
	Амуро-Охотская	—

Таблица 29

Провинции и районы распространения промышленных вод

Тип структур	Провинция	Район (бассейн)
Эпипалеозойские платформенные области	Скифская	Азово-Кубанский, Восточно-Предкавказский, Северо-Крымский
	Туранская	Мангышлак-Устюртский, Амударьинский, Чу-Сарысуйский
	Западно-Сибирская	Западно-Сибирский
Древние (докембрийские) платформенные области	Русская	Волго-Камский, Московский, Прибалтийский, Днепрово-Донецкий, Причерноморский, Печорский
	Прикаспийская	Прикаспийский
	Сибирская	Ангаро-Ленский, Туигусский, Якутский, Оленекский, Хатангский
Складчатые области	Кайнозойская (альпийская и камчатская) складчатость	Куринско-Апшеронский, Западно-Туркменский, Предкарпатский, Сахалинский
	Мезозойская складчатость	Усть-Колымский, Тахстахский
	Палеозойская (и более древняя) складчатость	Ферганский, Сурхан-Дарьинский, Минусинский

Углекислые воды. Провинция углекислых минеральных вод охватывает территорию горноскладчатых сооружений СССР, включая Карпаты, Кавказ, Памир, Тянь-Шань, Восточные Саяны, Прибайкалье, Забайкалье, Приморье, Чукотку, Камчатку. В тектоническом отношении эта провинция связана преимущественно со складчатыми сооружениями как альпийского возраста, так и с палеозойскими и мезозойскими сооружениями, омоложенными в альпийский тектоно-магматический цикл. В этой провинции преобладают трещинные и трещинно-жильные воды массивов кристаллических пород; кроме того, развиты трещинно-пластовые или порово-пластовые воды в наложенных и межгорных впадинах. Во всех случаях общим условием формирования углекислых вод является внедрение глубинной углекислоты преимущественно термометаморфического генезиса в верхние горизонты земной коры, где происходит насыщение ею подземных вод [7]. Металлоносность этих вод характеризуется по углекислым водам различных типов: сероводородно-углекислым, азотно-углекислым и углекислым.

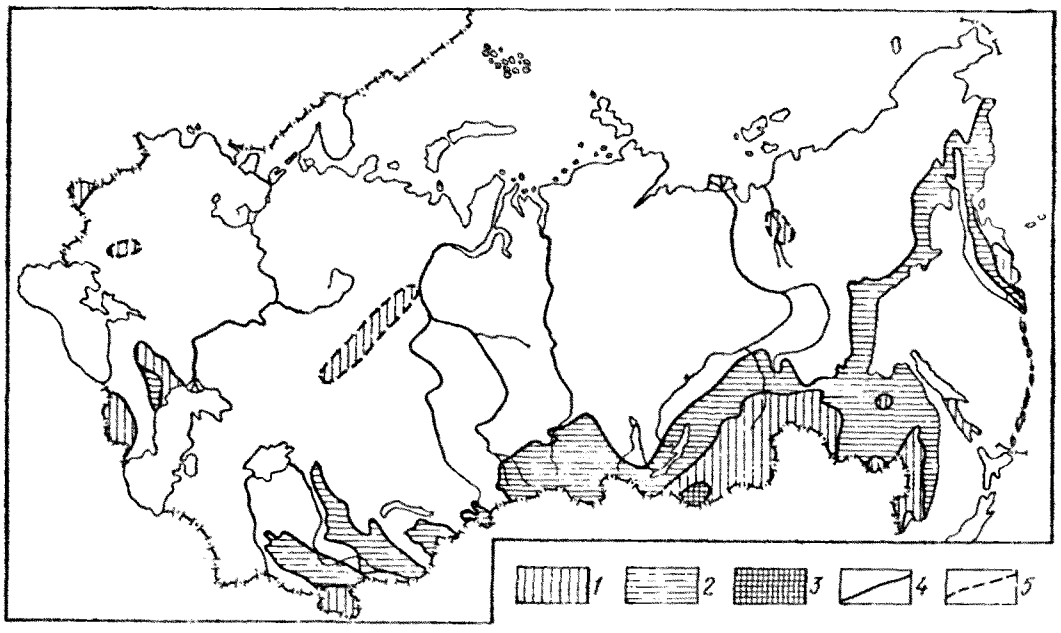


Рис. 3. Схема размещения провинций углекислых вод и азотных терм СССР. *По Г. С. Вартаняну.*

Провинции: *1* — углекислых вод; *2* — азотных терм; *3* — территории с развитием азотных терм и углекислых вод; *4* — граница между провинциями; *5* — предполагаемая граница между провинциями

Сероводородно-углекислые термы (фумарольные) распространены в районах Курило-Камчатской зоны. Формирование этих вод происходит в окислительной обстановке действующих вулканов при непосредственном воздействии вулканических газов (HCl, HF, H_2S, CO_2 и др.). По химическому составу — это сульфатные, сульфатно-хлоридные, иногда хлоридные воды с минерализацией до 70 г/л. Катионный состав представлен преимущественно железом (двух- и трехвалентным), алюминием, аммиаком, водородом или натрием. Температура вод до 100 °С, pH от 0,05 до 5,5. Воды газируют углекислым газом и сероводородом. Дебит источников обычно незначительный, тогда как суммарный расход дериватов превышает 20 л/с.

На Камчатке к этому типу вод относятся Верхне- и Нижне-Кошелевские, Восточно-Паужетские, Камбальные, Верхне-Жировые и другие источники; на Курильских островах — Менделеевские, Верхне-Юрьевские термы. Максимальные концентрации некоторых химических элементов состава этих терм приведены в табл. 30.

Азотно-углекислые хлоридные парогидротермы формируются в позднюю фазу поствулканических процессов, в глубинной восстановительной обстановке при аномально высоких геотермических условиях, создаваемых тепловыми потоками от активных вулканических очагов. По химическому составу это преимущественно хлоридно-натриевые воды с минерализацией до 5 г/л. Температура воды на поверхности близка к 100 °С, pH (на выходе) более 8.

Таблица 30

Максимальные концентрации (в мг/л) некоторых микроэлементов в гидротермах СССР. По Е. А. Баскову, Г. А. Голевой, С. Р. Крайнову и др.

Элементы	Тип гидротерм			
	Сероводородно-углекислые	Азотно-углекислые	Углекислые	Азотные
Железо	2300	—	—	—
Алюминий	1500	—	—	—
Цинк	90	0,6	0,71	0,5
Фтор	80	10	0,8	1,5
Медь	51	0,1	0,15	0,2
Бор (B_2O_3)	50	70	1000	8,0
Свинец	32	0,04	0,04	0,05
Мышьяк	30	25	4,0	2,5
Марганец	25	30	25	1,2
Литий	10	6,5	50	6,0
Стронций	9,5	0,6	29	31
Рубидий	1,6	2,5	24	0,4
Барий	1,2	—	4,6	5,9
Цезий	0,47	0,7	4,7	0,2
Кадмий	0,1	0,14	Не обн.	0,001
Молибден	0,05	0,05	0,01	0,05
Германий	0,02	0,16	0,17	0,16
Серебро	0,015	0,009	0,3	0,06
Ртуть	0,07	0,015	0,08	0,04
Золото	0,003	Не обн.	0,002	0,001
Вольфрам	0,002	0,032	0,02	3,0

Среди газов отчетливо преобладает углекислота, в подчиненных количествах отмечаются азот и сероводород. На Камчатке к этому типу вод относятся Паужетские, Киреунские, Узонские, Гейзерные и другие источники. Суммарный расход (в л/с) Паужетских источников около 210, Киреунских ~20—35, Узонских ~50—100. В настоящее время на базе Паужетского месторождения парогидротерм работает геоТЭС. Эти воды характеризуются максимальным содержанием марганца (см. табл. 30).

Углекислые воды (термальные и холодные) формируются в глубинной восстановительной обстановке в сфере воздействия термометаморфических процессов. Минерализация этих вод преимущественно до 3 г/л, реже — до 130 г/л. По химическому составу это преимущественно хлоридные и гидрокарбонатные воды или рассолы разнообразного катионного состава. Температура вод до 100 °С, pH менее 6,8. В составе газов преобладает углекислота с примесью азота и метана. В этих водах отмечаются максимальные концентрации хлора, натрия, кальция, магния, лития, рубидия, цезия, брома, йода, бора, серебра, ртути (см. табл. 30).

По металлоносности интересны воды Дарыдагской, Боксанской, Кармадонской, Анакавanской, Азатованской (Кавказ), Ква-

сы, Драговской, Майданской (Карпаты), Налычевской, Щапкинской (Камчатка), Синегорской (Сахалин) площадей.

На углекислых водах базируется множество санаторно-курортных комплексов: система курортов Кавказских минеральных вод, Боржоми, Анакаван, Исти-Су (Кавказ), Синегорские источники (о. Сахалин) и др.

Азотные воды. Азотные термальные воды прослеживаются практически вдоль всех южных и восточных границ СССР и в большинстве случаев непосредственно соседствуют с провинцией углекислых вод. Провинция азотных терм, как и углекислых вод, в основном совпадает с зоной новейшего горообразования, охватывая области как альпийской складчатости, так и палеозойской, омоложенных в кайнозойское время. По Г. С. Вартаняну, формирование азотных терм происходит в молодых зонах структур тектонических разломов вследствие нагрева проникающих туда инфильтрогенных вод или в глубоких частях артезианских бассейнов вследствие миграции их из фундамента.

Для этой провинции характерно широкое развитие трещинных и трещинно-жильных водоносных систем, приуроченных к гидрогеологическим массивам кристаллических и метаморфических пород. Однако часто эти термы имеют пластовое залегание в осадочных отложениях артезианских межгорных и предгорных прогибов, а также наложенных впадин.

Химический состав вод характеризуется преимущественно натриевым гидрокарбонатным, сульфатным или хлоридным составом с преобладающей минерализацией до 1 г/л, реже более. В газовом составе преобладает азот, реже метан; в зонах молодых разломов усиливается значение углекислого газа. Иногда для азотных терм характерны повышенные содержания гелия, местами сероводорода.

Температура вод до 100 °С и более, pH обычно более 8. В этих водах отмечаются максимальные концентрации стронция, бария, вольфрама, молибдена, германия (см. табл. 30).

На базе этих вод построены курорты и санатории Цхалтубо, Цаишн (Кавказ), Паратунка (Камчатка) и др.

ЗОНАЛЬНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Подземным водам и рассолам присуща различная по природе и формам проявления зональность: по площади и глубине артезианских бассейнов, по химическому и газовому составу, по особенностям динамики и распределения температур и т. д. Несмотря на отсутствие единства взглядов на природу зональности подземных вод и методологии исследования этого природного феномена, она является установленным фактом, ставшим предметом обсуждения одного из разделов современной региональной гидрогеологии.

Впервые на факт повышения солености подземных вод с увеличением глубины залегания и удаленности от области питания

водоносных горизонтов обратили внимание в 1900 г. С. Н. Никитин и Н. Ф. Погребов. Впоследствии уже более четко понятие о зональности подземных вод было сформулировано В. И. Вернадским, Б. Л. Личковым и другими учеными. Так, В. И. Вернадский отмечал, что с углублением в земную кору пластовые воды становятся все более концентрированными и что пресные пластовые воды сходят на нет и начинают преобладать пластовые рассольные воды. Им также отмечено, что с глубиной уменьшается подвижность и увеличивается температура подземных вод, а также меняется состав растворенных в воде газов. Дальнейшее развитие этих представлений привело к созданию учения о вертикальной зональности подземных вод.

Большое значение в развитии этого учения имели работы Н. К. Игнатовича, который впервые выделил три гидродинамические зоны подземных вод разного химического состава, последовательно сменяющие друг друга в вертикальном разрезе:

— верхняя зона активного водообмена и крупных динамических ресурсов, представленная преимущественно пресными водами, находящимися в условиях воздействия поверхностных факторов (климата, гидрографии и др.);

— средняя зона затрудненной циркуляции подземных вод, обычно представленная напорными пресными и повышенной минерализации водами переходного типа (сульфатными, сульфатно-хлоридными, щелочно-хлоридными и др.);

— нижняя зона застойного режима (относительного покоя) и накопления солевого комплекса, обладающая ограниченными статическими запасами рассолов в основном хлор-натриевого кальциевого состава.

Большинство гидрогеологов, следуя разработанному Н. К. Игнатовичем принципу, выделяют три гидрогеохимические зоны: 1) зону пресных вод гидрокарбонатного состава; 2) зону вод умеренной минерализации преимущественно сульфатного и сульфатно-хлоридного состава; 3) зону вод высокой минерализации хлоридного состава. Для установления более четких критериев гидрогеохимических зон коллектив ученых ВСЕГЕИ под руководством И. К. Зайцева предложил и использовал при мелкомасштабном гидрогеологическом картировании территории СССР в качестве основного признака степень минерализации подземных вод. В соответствии с этим были выделены зоны: А — пресных вод с минерализацией до 1 г/кг; Б — соленых вод с минерализацией от 1 до 35 г/кг; В — рассолов с минерализацией более 35 г/кг. Каждая зона делится на подзоны: в частности, в зоне В выделяются подзоны весьма слабых рассолов B_{70} (с минерализацией до 70 г/кг), слабых рассолов B_{140} (с минерализацией до 140 г/кг), крепких рассолов B_{270} (с минерализацией до 270 г/кг), весьма крепких рассолов B_{350} (с минерализацией до 350 г/кг) и сверхкрепких рассолов (с минерализацией более 350 г/кг).

Интенсивность нарастания минерализации подземных вод в различных бассейнах весьма различна и измеряется величиной

Таблица 31

Градиент минерализации подземных вод некоторых артезианских бассейнов СССР [12]

Гидрогеологические области, бассейны	Максимальная минерализация, г/кг	Глубина распространения максимальной минерализации, м	Градиент минерализации, (г/кг)/м
Восточно-Европейская			
Прибалтийский	152	2112	0,07
Северо-Двинский	224	2408	0,09
Московский	230	1916	0,16
Волго-Камский	271	2200	0,1—0,46
Львовский	222	3108	0,071
Диепровско-Донецкий	300	784	0,383
Каспийско-Черноморская			
Причерноморский	100	1500	0,07
Азово-Кубанский	113	3500	0,07
Терско-Каспийский	150	3500	0,08
Западно-Сибирская	75	3200	0,08
Амударьинский			
Западно-Туркменская	229	747	0,03
Амударьинский	154	1700	0,09
Восточно-Сибирская			
Якутский	86	2194	0,01—0,04
Ангаро-Ленский	418	1112	0,73
Межгорные артезианские бассейны			
Рионо-Куринский	171	370	0,46
Предкарпатский	202	70	2,9

градиента минерализации в пределах от 0,001 до 2,9 (г/кг)/м (табл. 31).

Зональность химического состава подземных вод и рассолов артезианских бассейнов проявляется также в пределах слагающих его водоносных комплексов: наиболее минерализованные воды приурочены обычно к наиболее опущенным частям комплекса, меньшая минерализация наблюдается в кровле и краевых его частях, что, по-видимому, связано с действием гравитационных сил и, в частности, с гравитационным перераспределением растворов разной плотности.

В целом нормальная гидрогеохимическая зональность более или менее присуща центральным частям артезианских бассейнов, в геологическом строении которых принимают участие морские отложения нормальной солености. При появлении в разрезе соленосных отложений эта зональность нарушается.

Характеризуя гидрогеохимическую зональность, М. Е. Альтовский отмечал наличие двух ее видов: один из них наблюдается при бурении (зональность напластования), другой имеет место по падению водоносных пластов (пластовая зональность). Вследствие различной водопроницаемости водоносных горизонтов в разрезе

осадочных отложений артезианских бассейнов смена типов вод по простиранию этих горизонтов происходит с разной интенсивностью и на разных расстояниях от областей питания. В связи с этим вблизи последних имеет место часто азональное распределение подземных вод в вертикальном разрезе краевых частей артезианских бассейнов. Это явление было достаточно четко зафиксировано в пределах Иртышского артезианского бассейна Б. Ф. Мавринским. Оно имеет место в прибортовых частях практически всех четко выраженных водонапорных систем и артезианских склонов.

Результаты гидрогеохимических исследований последних лет свидетельствует о более широком распространении азональности в подземной гидросфере, связанной с уменьшением минерализации подземных вод с глубиной (инверсии). Ю. А. Ежов, например, выделяет два вида гидрогеохимической инверсии: 1) с значительным уменьшением минерализации рассолов (до 20 г/л) и изменением с глубиной их типа от хлоридного до карбонатного; 2) с незначительным уменьшением минерализации рассолов и без изменения с глубиной их химического типа.

Первый вид гидрогеохимической инверсии установлен в областях альпийской складчатости (Западно-Туркменский, Куринский, Предкарпатский, Закарпатский, Северо-Сахалинский артезианский бассейны) и на эпигерцинских активизированных плитах (Западно-Сибирский, Южно-Мангышлакский, Западно-Крымский артезианские бассейны). Второй вид инверсии характерен для областей древних складчатостей (Волго-Уральский, Прикаспийский, Печорский, Днепровско-Донецкий, Хатангский, Ангаро-Ленский и другие артезианские бассейны). По мнению Ю. А. Ежова, второй вид инверсии является фрагментом первого, и при достаточной глубине буровых скважин будет всюду выявлена инверсия первого вида, что обосновывается региональным характером внедрения снизу газопарожидких существенно гидрокарбонатных опресненных флюидов по тектоническим зонам. Данные о глубинах появления инверсий в артезианских бассейнах СССР приведены в табл. 32.

Однако следует иметь в виду, что генезис азональных опресненных вод остается в достаточной степени дискуссионным. Так, например, по Восточному Предкавказью прямая гидрогеохимическая зональность подземных вод кайнозойских, меловых и юрских отложений сменяется азональными опресненными водами триасовых отложений. М. В. Мирошников и В. И. Рыбенко считают генезис глубокозалегающих опресненных вод триаса древнеинфильтрогенным. М. С. Бурштар определяет опресненные воды триасовых отложений как дегидратационные (из глин). По изотопным исследованиям М. Г. Тарасова следует, что это воды дегидратационные.

Общая гидрогеохимическая зональность артезианских бассейнов нарушается также в зонах проводящих разломов, за счет проникновения (сверху или снизу) опресненных или осолоненных вод. В целом сочетание гидрогеохимических зон в артезианских бас-

Таблица 32

Глубина появления гидрохимической инверсии в артезианских бассейнах СССР. По Ю. А. Ежову

Бассейны	Геотектоническая позиция	Возраст	Глубина, м		
			максимальная	минимальная	средняя
Первый вид инверсии					
Азербайджанский	Альпийская геосинклиналь	N_2	4100	420	1840
Западно-Туркменский	То же	N_2	3800	350	860
Грузинский	»	K_1	3000	2500	2750
Предкавказский	Альпийский краевой прогиб	J	4540	1500	2980
Керченско-Тамаиский	То же	N_2	—	200	--
Южно-Мангышлакский	Эпигерцинская плита	T	4100	3130	3615
Западно-Крымский	То же	K	3500	2700	3100
Западно-Сибирский	»	K—J	2900	1500	2200
Второй вид инверсии					
Волго-Камский	Эпиархейская платформа	$C—D_1$	2900	1200	2100
Днепровско-Донецкий	То же	C_{1-2}	3670	1750	2710
Прикаспийский	»	D_3	4900	2900	3800
Хатангский	»	D	2500	2000	2250
Ангаро-Ленский	Эпибайкальская платформа	ϵ	3000	1500	2250
Печорский	То же	D	3000	2500	2750

сейнах и слагающих их водоносных комплексов может быть самым разнообразным и отражать прямую и обратную, переменную и сложную гидрогеохимическую зональность разреза, что определяется историей геологического развития того или иного региона.

Гидробиохимическая зональность земной коры

Подземные воды и вмещающие их породы представляют собой благоприятную среду для развития микроорганизмов, под влиянием которых, по мнению В. В. Кесарева, в земной коре могут образоваться вещества, аналогичные тем, которые поступают из глубин планеты в результате глубинных высокотемпературных химических процессов. К их числу относят водород, азот, углекислый газ, метан, серу, сероводород, различные руды.

Микроогранизмы живут и развиваются в подземных водах при различных температурах, минерализации и pH. По данным Л. Е. Крамаренко, температурным пределом, при котором возможно их развитие, следует считать 100 °С [28]. Однако в последнее время появились сообщения о наличии микроорганизмов в

океанических гидротермах с температурой до 250 °С. Предел минерализации, при котором проявляется слабая жизнедеятельность организмов, 270 г/л или 300 г/л.

В низкотемпературных слабоминерализованных водах с низкими значениями pH (складчатые области и массивы) развиваются аэробные бактерии, характеризующиеся окислительными биохимическими функциями (в частности, тионовые). Высокотемпературные сильноминерализованные воды с высокими значениями pH (артезианские бассейны) содержат анаэробные бактерии, выполняющие восстановительные биохимические функции (в частности, сульфатвосстанавливающие).

Л. Е. Крамаренко на территории СССР выделяет следующие зоны: аэробную, смешанную, анаэробную. За пределами указанных температур и минерализации вод, где бактериальная жизнь в настоящее время не протекает, находится зона отсутствия бактерий (табл. 33).

Каждая из гидробиохимических зон характеризуется определенным групповым и видовым составом микроорганизмов и соответствующими продуктами их жизнедеятельности, которые являются признаками геохимических процессов в этих зонах.

Аэробная гидробиохимическая зона характеризуется тем, что в ней живут и проявляют геохимическую деятельность микроорганизмы, использующие в качестве внешних акцепторов только свободный кислород. В этой зоне протекают окислительные биогеохимические процессы. Продуктами жизнедеятельности здесь являются различные окисные формы углерода, азота, серы. Металлам зоны присуща наивысшая валентность. Зона благоприятна для перехода рудных элементов из пород в природные воды и их водной миграции.

В смешанной зоне развиваются бактерии, использующие в качестве внешних акцепторов не только свободный, но и связанный кислород в форме сульфатов, нитратов, углекислоты. В этой зоне происходят и окислительные, и восстановительные процессы. Смешанная зона охватывает как слабо-, так и сильноминерализованные воды (2—150 г/л), температура которых колеблется от 0 до 65 °С и выше. Глубина от 300 м (Якутский бассейн) до 3000 м и более (Западно-Сибирский бассейн).

Анаэробная гидробиохимическая зона характеризуется развитием бактерий, использующихся в качестве акцепторов только связанный кислород. В этой зоне протекают восстановительные биогеохимические процессы. Продуктами жизнедеятельности микроорганизмов являются восстановленные формы углерода, азота, серы. Зона благоприятна для перехода рудных элементов из подземных вод в породы, характерные для нефетегазоносных бассейнов.

В зоне отсутствия бактерий, где в настоящее время биохимические процессы не протекают, иногда обнаруживаются продукты жизнедеятельности микроорганизмов, что, по-видимому, свидетельствует о биогеохимических процессах, протекавших здесь в

прошлом. Зона отсутствия бактерий установлена в Ангаро-Ленском бассейне на глубине 500 м. Выделенная Л. Е. Крамаренко гидробиохимическая зональность согласуется с известной геохимической зональностью А. В. Щербакова [49], что вполне закономерно, так как обе зональности формируются под влиянием микроорганизмов.

Общей чертой горноскладчатых областей является развитие в их пределах только двух типов гидробиохимических зон: аэробной и смешанной.

Геотермическая зональность подземных вод

Изучением температурного режима подземных вод СССР в разное время занимались Б. А. Бедер, М. В. Беляков, К. Ф. Богородицкий, В. В. Иванов, В. И. Конопов, С. А. Красовский, Ф. А. Макаренко, Б. Ф. Мавринский, В. А. Покровский, Н. М. Фролов и другие исследователи. Ими было показано, что выраженные в отдельных регионах гидрогеотермические закономерности имеют своеобразие и специфику в разновозрастных тектонических структурах. Температура подземных вод платформенных и складчатых областей изменяется от —15 до +300—350 °С.

Геотермические исследования, проведенные в СССР, позволили установить гидрогеотермическую структуру того или иного тектонически обособленного района или их групп, имеющих близкие условия геологического развития, т. е. выявить особенности распределения температур по разрезу в породах и подземных водах.

Для платформенных областей геотермический градиент растет от древних щитов к эпипалеозойским плитам от 1 до 3 °С на 100 м. Плиты, граничащие с областями альпийского тектогенеза и претерпевшие значительное влияние неотектонической активизации, обладают повышенными геотермическими градиентами, достигающими на аномальных участках 4—5 °С на 100 м.

Геотермические условия складчатых систем зависят в основном от влияния на эти системы неотектонических движений. Во всех древних складчатых системах, от байкальской до мезозойской, не испытавших интенсивного влияния неотектонических движений, геотермические условия сходны и геотермические градиенты (вне влияния зоны активного водообмена) зависят в основном от степени метаморфизма и уплотнения пород. Геотермический градиент в этих районах составляет 1 — 1,5 °С на 100 м (район Казахского мелкосопочника, Урала, Таймыра, Енисейского кряжа).

В древних структурах, испытавших сильное влияние неотектонических движений, отмечается значительная дифференциация геотермических показателей. В результате крупных подвижек отдельных блоков по системе тектонических разрывов образовались многочисленные геотермические аномалии, связанные с разгрузками подземных вод, выносящих массы тепла с больших глубин. В куполе термоаномалий геотермический градиент увеличивается до 4 °С на 100 м и более. В удалении от мест разгрузки подзем-

Таблица 33

Гидробиохимическая зональность земной коры [28]

Зоны	Микроорганизмы	Внешние акцепторы электронов	Продукты жизнедеятельности бактерий	Коэффициент аэробности среды*, %	Eh, мВ	Гидродинамические этажи	Зоны (генезис вод, по И. К. Зайцеву)
Аэробная	Тионовые	O_2	SO_4, окисные формы металлов	От 0 до $+\infty$	От +800 до +100	Верхний	Свободного водообмена (инфильтрационные, преимущественно слабоминерализованные кислородно-азотные, гидрокарбонатные, кальциевые, а также сульфатные, преимущественно холодные воды)
	Нитрифицирующие	O_2	NO_3, NO_2				
	Метанокисляющие	O_2	CO_2, H_2O				
	Водородокисляющие	O_2	H_2O				
шанная	Тионовые	O_2	SO_4, окисная форма металлов	От 0 до 1	От +100 до —200	Верхний	Переходная от свободного к затрудненному водообмену (преимущественно инфильтрационные пресные и слабосоленые воды разного химического состава, холодные и термальные)
	Нитрифицирующие	O_2	NO_3, NO_2				
	Водородокисляющие	O_2	H_2O				
	Денитрифицирующие	NO_3, NO_2	N_2, CO_2				
	Сульфатвосстанавливающие	SO_4	H_2S, восстановленные металлы				

Сме	Метанопродуцирующие	CO_2	CH_4				
	Водородопродуцирующие	—	H_2				
Анаэробная	Сульфатвосстанавливающие	SO_4	H_2S, восстановленные металлы	От $-\infty$ до 0	От —200 до —400 и ниже	Верхний	Затрудненного водообмена (инфильтрационные, седиментогенные и метаморфогенные воды, преимущественно термальные)
	Денитрифицирующие	NO_3 NO_2	N_2CO_2				
	Метанопродуцирующие	CO_2	CH_4				
	Водородопродуцирующие	—	H_2				
Отсутствие бактерий	Не обнаружнваются	CO_2	CH_4, N_2, H_2S, восстановленные формы металлов	—	—	Нижний	Весьма затрудненного водообмена (преимущественно седнментогенные, метановые, углекисло-метановые, хлоридные, высокотемпературные)

* Отношение встречаемости аэробных бактерий к анаэробным.

ных вод величина градиента обычно не превышает 1,5 °С на 100 м (в зависимости от состава пород). К таким районам относятся Байкальская складчатая система, Тянь-Шань.

Наиболее дифференцированными становятся геотермические условия в областях кайнозойской складчатости. Частые термоаномалии связаны здесь с тектоническими нарушениями, которые секут осадочные породы, смятые в складки различной интенсивности. По нарушениям происходит разгрузка глубоких нагретых флюидов, и на участках разгрузки в куполе термоаномалий геотермический градиент повышается до 5 °С на 100 м, снижаясь вне термоаномалий до 1,5 °С на 100 м (районы Малого и Большого Кавказа).

Самыми интенсивными и обширными термоаномалиями характеризуются районы современного вулканизма (Камчатка, Курилы). Градиенты в куполах термоаномалий часто превышают 10 °С на 100 м (особенно на участках парогидротерм). Но и здесь, по данным Б. Ф. Маврицкого, вне термоаномалий величина геотермического градиента обычно лежит в пределах 1,5—2,0 °С на 100 м, реже 2,5 °С на 100 м [26].

Органическое вещество в подземных водах

Исследованиями отечественных и зарубежных ученых было показано, что в подземных водах и рассолах присутствуют практически все химические группы (углеводы, белки и жиры) и классы органических соединений (углеводороды, спирты, эфиры, карбоновые кислоты, амины и др.). Наиболее полно результаты этих исследований нашли отражение в работах М. Е. Альтовского, Е. А. Барс, Л. А. Гуляевой, В. К. Кирюхина, В. М. Матусевича, М. И. Субботы, Я. А. Ходжакулиева, В. М. Швеца и других исследователей.

Пластовые воды осадочных бассейнов, особенно нефтегазоносных, содержат воднорастворимые органические вещества неодинакового происхождения. По данным М. И. Субботы, органическое вещество пластовых вод может иметь следующий генезис: сохраняться с седиментационными водами и илистыми растворами бассейнов седиментации; поступать в пласт с отжатыми поровыми растворами из глинистых толщ и особенно из нефтегазоматеринских пород; мигрировать в водоносный пласт из пород путем диффузии, эффузии или с сжатыми газами; мигрировать при рассеивании углеводородов из залежей нефти и газоконденсата; мигрировать в пласт с водой при межпластовых перетоках, при инфильтрации вод с поверхности, а иногда и при внедрении вод по зонам нарушений из нижних частей земной коры; формироваться за счет жизнедеятельности пластовых организмов (включая тела самих организмов).

Между концентрацией органического вещества в пластовых водах и породах отмечается тесная корреляционная связь [1]. Однако соотношение количества органического вещества, рассеянно-

го в породах и переходящего в пластовые воды, не является постоянным, что зависит от состава исходного органического вещества (сапропелевое, гумусовое, смешанное), степени его метаморфизации, термодинамических условий недр и тектонической активности региона и конкретного участка. На древних платформах, где тектоническая активность ослаблена, преобразование рассеянного в породах органического вещества в миграционно-способные формы идет замедленно и пластовые воды относительно обеднены растворенным органическим веществом. Наоборот, в условиях молодых платформ, где тектоническое преобразование структуры бассейна проявляется более активно, метаморфизация органического вещества идет глубже и значительно быстрее, и пластовые воды сильнее обогащаются органическим веществом [14]. Содержание в водах растворенных газов, в частности CO_2, и повышенная температура (мягкий термолиз при 100—150 °С), по мнению В. М. Швеца, также активизируют переход органического вещества из пород в подземные воды [27].

Наиболее высокие фоновые концентрации водорастворимого органического вещества наблюдаются в пластах, лежащих в зоне главной фазы нефтеобразования, а низкие его концентрации распространены на участках активной гидродинамики, связанной с внедрением и циркуляцией инфильтрационных вод. Как и следует ожидать, максимальное обогащение подземных вод органическим веществом происходит в зонах нефтяных и газоконденсатных месторождений. Концентрации водорастворенных органических веществ здесь достигают 800 мг/л и более.

Необходимо отметить, что в виде металлоорганических и других комплексообразующих соединений в подземных водах и рассолах встречаются разнообразные микроэлементы. В нефтях обнаружено около 40 элементов-металлов и некоторые из них образуют ореолы рассеяния в водах, окружающих залежь.

Э. Е. Лондон отмечает, что для установления степени обогащения подземных вод органическим веществом можно использовать йодо-бромный и бор-бромный коэффициенты, значение которых возрастает вблизи нефтегазовых залежей. С. М. Катченков, М. С. Гуревич, В. А. Кротова и другие исследователи установили определенную связь между содержанием ванадия, никеля, хрома, меди, кобальта, молибдена и ряда других элементов в нефтяных залежах и в подземных водах. Для подземных вод Западной Сибири В. М. Матусевичем было показано, что содержание в водах никеля, меди, молибдена, кобальта, серебра, ванадия, германия, серы по мере удаления от водонефтяного контакта падает, образуя четкие ореолы вокруг залежей.

Из органического вещества в подземные воды могут поступить йод, бром, бор, литий, рубидий, стронций, барий, свинец, медь, цинк, железо, ванадий, серебро, хром, никель, титан и другие элементы. Однако изученность процессов перехода этих элементов из органического вещества в подземные воды (кроме йода, брома и бора) недостаточна.

Газовый состав подземных вод

Зональность газового состава артезианских бассейнов отражает как зональность процессов нефтегазообразования, так и особенности термодинамических условий, геологическую и гидрогеологическую историю его развития. Эта зональность подробно охарактеризована в работах Л. М. Зорькина, В. В. Иванова, А. А. Карцева и других исследователей и заключается в постепенном изменении состава растворенных в воде газов от кислородно-азотных и азотных через сульфатно-азотные и метаново-азотные к чисто метановым и углекисло-метановым. Газовый состав подземных вод обычно хорошо увязывается с их химическим составом и гидродинамическими условиями глубоких водоносных горизонтов, к которым эти воды приурочены.

По данным Л. М. Зорькина и др. [14], в подземной гидросфере осадочной оболочки земной коры содержатся $n \cdot 10^{16}$ м^3 газа, при этом лишь в подземных водах нефтегазоносных бассейнов СССР до глубины 4 км находится не менее $4 \cdot 10^{15}$ м^3 газа (табл. 34).

Ресурсы водорастворенных газов неравномерно распределены по стратиграфическому разрезу. Наиболее обогащены газами воды мезозойских отложений $2{,}1 \cdot 10^{15}$ м^3, около $1{,}1 \cdot 10^{15}$ м^3 газов растворено в водах палеозойских систем, в водах протерозоя и кайнозоя их $0{,}32 \cdot 10^{15}$ м^3 и $0{,}48 \cdot 10^{15}$ м^3. Газонасыщенность подземных вод и нефтеносность разреза находится в прямой зависимости от содержания $C_{орг}$ в породах.

Интенсивность реализации нефтегазоматеринского потенциала осадочных отложений зависит от геологических, и в первую очередь термобарических условий. Различные типы бассейнов характеризуются различными термобарическими условиями, поэтому наблюдается зависимость газонасыщенности подземных вод от типа бассейнов, она увеличивается в системах от бассейнов платформенного типа к предгорным в палеозое и мезозое, а в кайнозое — к межгорным бассейнам современных геосинклиналей, т. е. в направлении ужесточения термобарических условий (табл. 35).

Однако в пределах даже одних и тех же бассейнов наблюдается широкий размах варьирования газонасыщенности вод, что обусловлено различной глубиной отбора проб, поскольку газонасыщенность вод определяется, с одной стороны, особенностями водонапорной системы (давление, температура и минерализация вод), с другой — зональностью нефтегазобразования. В изученных бассейнах СССР газонасыщенность вод меняется от $8 \cdot 10^{-5}$ до $4{,}6 \cdot 10^{-3}$ м^3/л. Изменение ее происходит главным образом за счет метана, поскольку газонасыщенность вод другими компонентами (азот, углекислый газ) изменяется в небольших пределах от $3 \cdot 10^{-5}$ до $5{,}4 \cdot 10^{-5}$ м^3/л и от $4 \cdot 10^{-6}$ до $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ м^3/л, соответственно.

В составе водорастворенных газов наблюдаются определенные закономерности, зависящие от возраста бассейна. Так, от кайнозоя к палеозою снижается содержание метана, а содержание его ана-

Таблица 34

Ресурсы растворенных газов пластовых вод нефтегазоносных бассейнов [14]

Геологическая структура	Бассейн	Возраст вмещающих пород	Ресурсы растворенных газов, трлн. м³
Восточно-Европейская платформа	Прибалтийский	PZ	0,01
	Львовский	PZ	17
	Среднерусский	PR—PZ	0,3
	Тимано-Печорский	PR—PZ	280
	Припятско-Днепровско-Донецкий	PZ	57
	Прикаспийский	KZ—PZ	980
	Волго-Уральский	KZ—PZ	140
Сибирская платформа	Иркутский	PR—PZ	32
	Тунгусский	PR—PZ	167
	Приверхояиско-Вилюйский	PZ—MZ	355
	Анабаро-Ленский	PZ—MZ	59
	Енисей-Хатангский	PR—MZ	132
Западно-Сибирская платформа	Западно-Сибирский	MZ	1000
Скифская плита	Азово-Кубанский	MZ—KZ	180
	Среднекаспийский	MZ—KZ	259
Туранская плита	Южно-Каспийский	KZ	120
	Кызылкумский	MZ—KZ	44
	Чу-Сарысуйский	PZ—MZ	21
	Каракумский (совместно с Устюртским)	MZ—KZ	86

логов и азота возрастает. Содержание CO_2 уменьшается от KZ к MZ от 1,8 до 0,5 % (табл. 36).

При сильно повышенных геотермических режимах (например, в Предкавказье) содержание CO_2 возрастает иногда до 40 % и более. Увеличение содержания CO_2 при высоких температурах и давлениях связано как с усилением отдачи CO_2 органическим веществом на больших глубинах, по Е. А. Рогозину, так и с появлением в составе газа гидролизной CO_2, образующейся при взаимодействии карбонатов с водой, по И. Г. Киссину и С. И. Пахомову.

В составе подземных вод горноскладчатых и вулканических областей присутствуют газ более сложного состава (CO_2, H_2S, SO_2, CH_4, N_2, H_2, HCl, HF и др.), чем в платформенных областях, а гидротермы этих регионов, по В. В. Иванову, принято называть по

Таблица 35

Газоносность подземных углеводородных вод в различных типах нефтегазоносных бассейнов ($см^3/л$) [14]

Возраст вмещающих пород	Тип бассейна*					
	I	II	III	IV	V	VI
PR_3—PZ	200—960** / 580	—	—	—	—	—
PZ_2	190—1080 / 400	92—1412 / 325	80—1200 / 550	—	—	—
MZ	—	200—2400 / 1100	—	780—4600 / 2530	—	—
KZ	—	110—970 / 440	—	570—1570 / 1100	1260—3500 / 1700	750—2700 / 1900

* Типы бассейнов: равнинные с архейским (I) и эпигерцинским (II) фундаментом; предгорные с допалеозойским (III) и послепалеозойским (IV) обрамлением; межгорные (V) и современных геосинклиналей (VI).

** В числителе — размер варьирования, в знаменателе — мода.

составу преобладающих газов: сероводородно-углекислые, азотно-углекислые и азотные.

Таким образом, минеральные, термальные и промышленные воды представляют собой сложные многокомпонентные системы, характеризующиеся закономерным изменением минерального, органического и газового состава в зависимости от структурно-тектонических особенностей, литолого-стратиграфической и термо- и гидродинамической их приуроченности. Приведенные сведения отвечают лишь самому общему описанию статической модели подземной гидросферы СССР. Соответственно этому в гл. 5 нами изложены основные черты динамической и ретроспективной гидрогеологических моделей.

Таблица 36

Состав углеводородных газов подземных вод (для глубин до 4 км) [14]

Возраст пород	Состав газа, % (модальные значения)						
	CO_2	CH_4	ТУ*	H_2	N_2	He	Ar
KZ	1,8	96,5	0,3	0,5	2,5	0,012	0,03
MZ	1,1	85,1	5,3	4,0	5,7	0,09	0,05
PZ	0,5	81,7	4,6	—	13,2	—	—
PR_3—PZ	1,3	84,3	3,1	0,6	11,1	0,199	0,160

* ТУ — тяжелые углеводороды.

Глава 4

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

О МЕХАНИЗМАХ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГЛУБОКИХ ЗОН

Развитие знаний о геологическом строении Земли, о процессах массопереноса, протекающих в зоне гидрогеосферы, определяется постоянно возрастающими запросами практики, связанными с расширением и более рациональным использованием природных, и в первую очередь водоземельных ресурсов. Детально изучаются закономерности формирования, движения и локализации подземных вод в неглубоких зонах, что обусловлено необходимостью более углубленного знания условий действия водозаборов, процессов в зоне действия строящихся и эксплуатируемых объектов крупного строительства. В значительно меньшей мере изучены основные физико-химические и термодинамические процессы в нижних зонах гидрогеосферы. Существующие точки зрения на механизм движения подземных вод в этих зонах противоречивы и схематичны. В настоящее время мы не располагаем достоверными сведениями о характере разнообразных гидрогеологических процессов, протекающих в нижних этажах гидрогеосферы; фактические наблюдения и измерения по ограниченному количеству параметров недостаточны для понимания всей сложности гидрогеологических условий. Именно эти обстоятельства послужили причиной для существования порой взаимоисключающих представлений о динамике флюидов глубоких частей разреза. Так, одни ученые (М. Е. Альтовский, В. А. Кротова, А. И. Силин-Бекчурин и др.) отводят гидростатическому напору роль ведущей силы, определяющей движение флюидов в глубоких зонах литосферы, другие — отрицают главенствующее влияние этих процессов (Г. Ю. Валуконис, И. К. Зайцев, Ю. В. Мухин и др.).

Попытки найти универсальное решение, характеризующее все случаи движения флюидов в недрах, привели некоторых исследователей к необходимости обратиться к универсальному силовому фактору — воздействию гравитационного поля Земли. Экспериментальное изучение потенциального перемещения водных растворов различной плотности в пористой среде было начато более 20 лет назад.

Выдвинутая С. М. Григорьевым гипотеза о существовании дренажной оболочки у основания континентальной коры предполагает, что под действием сил гравитации и постепенного увеличения плотности свободной (жидкой) воды образуются нисходящие токи, которые, достигнув дренажной оболочки, вытесняют пар. При этом растворы, нагреваясь до температур 425—450 °С, сами переходят в парообразное состояние.

Широкое признание получили представления о системе дренажа и стока в земной коре, основанные на гипотезе глобальной тектоники. В этом случае рифтовым зонам как глубоким дренам

отводится особая роль. Модель глубинных систем дренажа и стока представляется таким образом, что осложненные зоны — магматические тела и глубинные разломы — дренируют мантию и одновременно обеспечивают проникновение вглубь вадозных вод, т. е. океанические и континентальные рифты создают условия для восходящего и нисходящего движения воды. В этом случае считается, что глубина погружения инфильтрационных вод по тектоническим разломам достигает 5—6 км. Причем движущей силой является в основном различие в плотности жидкостей в зависимости от их температуры.

В современной гидрогеодинамической проблематике особняком стоит весьма сложная задача по истолкованию закономерностей формирования зон аномально высоких пластовых давлений. Вопросам формирования гидродинамических аномалий посвящены многочисленные работы советских и зарубежных ученых. Согласно существующим представлениям, непременным условием формирования гидродинамических аномалий должна быть изоляция пластового резервуара от смежных частей водонапорной системы. В качестве основных факторов, повышающих давление в пластах, рассматриваются геостатическое давление, тектоническое напряжение, передача давления жидкости из более глубоких высоконапорных зон, перемещение замкнутых пластов на более высокие гипсометрические уровни, а также факторы, обусловленные физико-химическими процессами в замкнутых пластах. В этом случае при попытках найти расшифровку описанному явлению практически непреодолимым барьером выступает эффект релаксации давлений, который неизбежно обусловливает выравнивание давления во времени и пространстве в случае импульсного создания пьезоаномалий в некотором резервуаре.

Из приведенного весьма краткого обзора современных представлений о гидрогеодинамических процессах, и прежде всего о процессах миграции флюидов в глубоких этажах литосферы, можно заключить, что в настоящее время с позиций классической теории гидравлических (физико-химических, термодинамических) потенциалов не удается однозначно истолковать то многообразие природных фильтрационных процессов, которые регистрируются в настоящее время при изучении недр. Именно поэтому приобретают особый интерес новые геолого-гидрогеологические явления, установленные в последние несколько лет и позволяющие выявить ряд закономерностей, предопределяющих размещение и миграцию надкритических флюидов в глубоких частях литосферы.

Открытие неизвестного ранее явления глобально выдержанных быстропротекающих (от нескольких суток до нескольких месяцев) пульсационных изменений в гидрогеосфере, так называемого гидрогеодеформационного (ГГД) поля, послужило основой для понимания механизма движения подземных вод в глубоких этажах коры и для познания основных движущих сил, определяющих формирование гидродинамических, производных и гидрохимических обстановок на больших глубинах [30].

Накопленный к настоящему времени обширный эмпирический материал по режиму подземных вод свидетельствует о достаточно тесной связи ряда параметров гидрогеологического режима недр с сейсмическими процессами. Имеются сведения о подчиненности вариаций гидродинамического режима недр сейсмотектоническим напряжениям (о чем сказано будет ниже). Как показывают многочисленные экспериментальные исследования, кривые сжатие—растяжение, полученные с помощью деформографов, соответствуют кривым, характеризующим положение уровня воды в скважине в данном пункте. Наличие связи между процессами сжатия—растяжения и понижением уровня подземных вод, их минерализацией, температурой и другими параметрами свидетельствует о влиянии деформации толщ на емкости водонасыщенных пород, т. е. справедливо предположение о переменных во времени и пространстве емкостных свойствах коллектора как функции напряженного состояния всего массива. Таким образом, данные по вариации напоров и температур подземных вод (изотопного, химического и газового состава) содержат огромную гидрогеодинамическую информацию о геологотектонических процессах.

Природа ГГД поля заключается в пульсационном перераспределении флюидных составляющих литосферы, вызванном сменой естественных (эндогенных, экзогенных, космических) или техногенных напряжений в ее твердой части, что проявляется в непрерывном возникновении и распаде множеств термогидродинамических и физико-химических аномалий, контролирующих местоположение областей развития скоротечных деформационных процессов, вызывающих возникновение короткоживущих структур сжатия и растяжения. ГГД поле является результирующей одновременного действия во всем объеме литосферы множества разных по интенсивности и нередко разнонаправленных процессов деформации вещества недр.

Исследование ГГД поля крупных регионов СССР позволило выявить особенности зарождения и развития короткоживущих структур деформации и проследить ряд характерных черт протяженных геологических регионов. Установлено, что в подавляющем большинстве случаев как в горноскладчатых регионах, так и в пределах платформ и щитов имеет место неупорядоченное строение ГГД поля, когда зоны растяжения в виде изолированных коробчатых структур в короткие отрезки времени появляются и вырождаются среди участков слабого сжатия. Такие морфологические изменения поля имеют мерцательный характер. Отмечается достаточно четкая закономерность в развитии во времени отдельных структур ГГД поля; например, деформация растяжения, которая развивается на определенной площади, достигая некоторого предела, релаксирует, сменяется относительным сжатием.

Проведенный анализ формирования и эволюции ГГД поля позволяет принципиально по-новому понимать процессы, протекающие в гидрогеосфере в пределах горноскладчатых областей, платформ и щитов. Гидрогеологическая информация, полученная за

некоторый период времени, отражает переменный характер параметров толщ (уровне- и пьезопроводность, коэффициент фильтрации и др.), а изменения этих параметров во времени связаны с влиянием совокупности всех эндо-, экзо- и техногенных процессов.

Таким образом, речь идет о новом виде геофизического поля, позволяющего оперативно следить за быстрыми изменениями гидродинамической обстановки как в пределах отдельных геологических мегаструктур, так и в глобальном масштабе.

Для исследования процессов эволюции ГГД поля и оценки темпов развития гидрогеодеформационных процессов в региональном плане нами введен интегральный количественный показатель — коэффициент несбалансированной деформации K_e, учитывающий совокупность всех значений сжатия и растяжения, зафиксированных в пределах конкретной геологической структуры на определенный момент времени τ_n. В этом случае производная K_e по времени ΔK_e будет характеризовать темп и направленность процесса деформации крупных массивов горных пород по сравнению с предшествовавшим моментом времени τ_{n-1} процесса изменения физических свойств пород, включая их фильтрационную проницаемость. Как показывает такой график, имеют место весьма существенные колебания значений ΔK_e, достигающие за короткие промежутки времени 20 и более кратных величин. При этом наблюдаются 3—4-суточные циклы. Рассмотрение кривой ΔK_e—τ свидетельствует также о существовании некоторых «импульсных» моментов, после которых процесс деформации геологических толщ как бы стремится к затуханию.

Одной из наименее исследованных в современной глубинной гидрогеодинамике является проблема нижней границы гидрогеосферы. Традиционная позиция по этому вопросу сводилась к обобщению накопленных данных по проницаемости нефтегазовых коллекторов, на основе чего делается вывод о том, что на глубинах 4—5 км все еще могут происходить процессы латеральной миграции жидкостей (и прежде всего воды). Считалось, что ниже этих отметок гидрогеологические процессы не протекают, поскольку здесь, в условиях высоких геостатических давлений, любые толщи горных пород утрачивают свои изначальные емкостные свойства.

Исследования, проведенные в Кольской сверхглубокой скважине СГ-3, позволили изучить условия формирования подземных вод и характер обводненности глубоких этажей земной коры, представленных древними метаморфическими толщами пород. Впервые прямыми наблюдениями установлено, что свободные гравитационные подземные воды распространены по всей толще древних глубокометаморфизованных пород Печенгского субартезианского бассейна до глубины более 10 км, и по химическому составу подобны метаморфизованным морским седиментационным (формационным) водам, развитым в глубоких горизонтах древних платформ, предгорных и межгорных впадин, но претерпевшим

затем длительную и сложную эволюцию. Для лучшего понимания значения выявленного факта кратко охарактеризуем гидрогеологическую обстановку в данной гидрогеологической структуре.

В Печенгском бассейне четко выделяются два этажа. Верхний этаж (0—6835 м) представлен метаморфизованными осадочными и вулканогенными образованиями печенгской серии (собственно артезианский бассейн); нижний — глубокометаморфизованными породами (полиметаморфическими) архейского комплекса (фундамент бассейна). В процессе общего поднятия территории в верхней части разреза возникла экзогенная трещиноватость, характерная для кристаллических щитов. Мощность этой зоны трещиноватости изменяется от 500 до 2000 м (в среднем 800 м). Подземные воды этой зоны развиты в породах различного состава и формируют слой фронтальной циркуляции, определяющий региональный подземный сток на Кольском полуострове. Эти подземные воды слабо минерализованы и имеют атмосферное происхождение. Интенсивность экзогенной трещиноватости весьма слабая; коэффициенты водопроводимости редко превышают 1—2 м^2/сут и только в зонах тектонических нарушений их значение несколько увеличивается.

Ниже зоны экзогенной трещиноватости до глубины 4,5 км, по данным Ю. П. Смирнова, число трещин очень незначительное (0,01—0,04 м/м, достигая 0,2 м/м в зонах тектонических нарушений). Породы вне зон тектонических нарушений практически непроницаемые (10^{-8}—10^{-9} мкм^2). Ниже глубины 4,5 км в породах встречаются зоны с четко выраженной рассланцованностью. Число трещин в этих зонах увеличивается до 0,3 м/м, достигая местами 0,7 м/м (в интервале 4,8—4,9 км), что сравнимо с зоной экзогенной трещиноватости. Все это свидетельствует о совершенно разной природе формирования трещиноватости в интервалах выше и ниже 4,5 км. Зону разреза ниже 4,5 км мы называем зоной регионального гидрогенного разуплотнения. Нижняя ее граница опускается до глубины 9 км, а мощность превышает 4 км. Вся эта зона насыщена свободной (гравитационной) водой, о чем свидетельствует почти постоянное проявление притока воды в ствол скважины в процессе бурения.

Существование зоны регионального разуплотнения обнаружено впервые при бурении Кольской сверхглубокой скважины. Коэффициент фильтрации пород в этой водоносной зоне (по данным гидродинамических испытаний) составил 10^{-7} м/сут. Полученный результат имеет принципиальное значение, так как ранее метаморфические породы на таких глубинах считались вообще непроницаемыми для воды вне зон тектонических нарушений. Одновременно установлено, что пластовое давление здесь приближается к геостатическому. Это и предопределяет заметный приток подземных вод в ствол скважины при общей низкой проницаемости пород. В отдельных интервалах, где гидродинамические проявления отмечались значительно сильнее, трещинная проницаемость может быть на порядок выше.

Ниже глубины 9 км резко уменьшаются число и мощность зон трещиноватости с проявлениями подземных вод. Их мощность не превышает 10—20 м, но интенсивность водопритоков свидетельствует о достаточно высокой проницаемости водоносных зон. Быстрое прекращение водопритоков указывает на их локальное распространение.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в процессе бурения сверхглубокой скважины СГ-3 впервые была встречена зона разуплотнения горных пород на больших глубинах, образование которой является следствием течения процесса прогрессивного метаморфизма. В процессе метаморфизма происходит выделение свободного флюида из минеральных гидратов (хлорита, эпидота, слюд и т. д.). Например, при реакциях дегидратации, приводящих к превращению пород фации зеленых сланцев в породы амфиболитовой фации, из кристаллических решеток силикатов высвобождается в среднем 2 % H_2O. Эта вода вместе с остаточной водой, сохранившейся на предыдущей стадии, неравномерно распределена внутри порового пространства и в системе микротрещин по границам зерен. Поскольку суммарный объем воды и новообразованных минералов больше, чем объем исходных минералов, ремобилизованная в процессе метаморфизма вода способствует разуплотнению пород метаморфизуемой толщи и увеличению ее общей пустотности. Это связано с тем, что: а) высокие давления высвобождающейся воды обусловливают возникновение микрогидроразрывов особенно в тех точках, где количество ее относительно больше; б) занимая достаточно большой объем, выделившаяся вода препятствует уплотнению толщи в процессе перекристаллизации, так как низкая проницаемость пород затрудняет удаление воды. Значительная часть метаморфического флюида находится в изолированных порах и трещинах; в) метаморфогенные воды в силу условий своего образования обладают высокой агрессивностью и выщелачивающей способностью и могут растворять некоторые компоненты породы, увеличивая тем самым общую ее пустотность.

В результате образуется мощная зона гидрогенного разуплотнения, содержащая свободную гравитационную воду и образующая единый водоносный комплекс.

Установленное по данным исследований при бурении Кольской сверхглубокой скважины явление гидрогенного разуплотнения пород коренным образом меняет представление о круговороте воды в условиях континентов и о строении гидрогеосферы. Стало возможным перейти от гипотез к освещению гидрогеологического строения разреза больших глубин и объяснению протекающих процессов на основе фактических наблюдений.

Таким образом, факт установления в глубоких частях разреза зоны гидрогенного разуплотнения пород наряду с результатами исследования особенностей развития ГГД поля приводит нас к пониманию основных механизмов, определяющих миграцию и локализацию флюидов в глубоких горизонтах литосферы.

В заключение можно отметить, что движение подземных вод, направленность миграции флюидов определяется внутрипоровыми, внутритрещинными давлениями, формирующимися под воздействием непрерывно меняющихся во времени и пространстве зон сжатия и растяжения. Движение подземных вод направлено от зон сжатия к зонам растяжения латерально и вертикально по разрезу.

В силу постоянного пульсационного перераспределения флюидных составляющих литосферы под воздействием напряжений в твердой части движение подземных вод носит непрерывно меняющуюся направленность. Это приводит к региональному выравниванию гидрохимического облика подземных вод, чем и объясняется однотипность минерализации подземных вод на обширных территориях: в глубоких частях разрезов происходит как бы перемешивание флюидальной составляющей.

Из сказанного следует, что на больших глубинах, помимо гидродинамических процессов, определяемых гидростатическими силами и упругими свойствами пластовых водонапорных систем, действуют два механизма, определяющие дополнительные особенности динамики глубоких подземных вод.

1. Пульсационное перераспределение флюидных составляющих литосферы, вызванное сменой напряжений в ее твердой части, что проявляется в непрерывном возникновении и распаде множеств термогидродинамических и физико-химических аномалий под воздействием скоротечных (от нескольких суток до нескольких месяцев) деформационных процессов, вызывающих возникновение и распад короткоживущих структур сжатия и растяжения.

2. Процессы метаморфизма, выраженные гидратацией или дегидратацией минерального вещества с формированием водонасыщенных зон гидрогенного разуплотнения пород.

Первый механизм обеспечивает формирование и изменение гидрогеодеформационного поля на фоне общего гидрогеодинамического под влиянием сейсмогеологических процессов. Второй объясняет формирование минерализованных подземных вод на больших глубинах и возможные пути обогащения пластовых подземных вод некоторыми редкими и рассеянными элементами.

ПРОЦЕССЫ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПЛАСТОВЫХ ВОДОНАПОРНЫХ СИСТЕМ В ПОРОДАХ-КОЛЛЕКТОРАХ

Проблема регионального движения подземных вод в артезианских бассейнах разрабатывается уже весьма длительное время. Достаточно сказать, что еще древние греки выдвигали гипотезу о том, что вода движется по подземным каналам от более высоких отметок к более низким. И в дальнейшем некоторые ученые обращали внимание на наличие такого движения в подземных условиях. В XX в. эти вопросы стали разрабатываться уже многочисленной армией гидрогеологов, в первую очередь такими

крупными учеными, как А. Н. Семихатов, Н. И. Толстихин, А. М. Овчинников, Б. Л. Личков и многие другие.

Однако вопросы региональной гидродинамики рассматривались в основном с качественной стороны. В это время была предложена классическая схема артезианского бассейна, состоящая из областей питания, транзита и разгрузки, даны типизация артезианских бассейнов по ряду признаков и т. д. По гидродинамическому принципу были выделены в разрезе три зоны — активного водообмена, замедленного водообмена и застойного режима. Одновременно возникло и весьма важное противоречие. Горизонтальная зональность плохо увязывалась с вертикальной. Действительно, зона застойного режима, т. е. отсутствия движения, попадала в область транзита, т. е. наличия движения.

Немногочисленные попытки количественной оценки скорости водообмена в нижних частях артезианских бассейнов проводились без учета их специфики, в первую очередь вариаций плотности подземных вод.

Качественно новой страницей в истории развития рассматриваемой проблемы явилась работа А. И. Силина-Бекчурина, в которой впервые было сформулировано понятие о приведенном напоре как потенциальной функции тока. Эта работа послужила мощным толчком к дальнейшей активизации изучения динамики глубоких подземных вод крупных артезианских бассейнов в целом, отдельных их частей, областей развития нефтяных и газовых залежей и т. д.

В последующие годы идея приведенных напоров развивалась в трудах большого числа исследователей, в основном по линии разработки методов их вычисления, построения и анализа соответствующих карт. Такие карты были построены для всех крупных артезианских бассейнов, благодаря чему прояснились многие черты их гидродинамической структуры. Одним из важнейших результатов этих работ был вывод о том, что роль областей инфильтрационного питания для глубоких частей артезианских бассейнов в значительной мере преувеличивалась. Так, было показано, что Урал практически не оказывает влияния на динамику и режим подземных вод Волго-Камского артезианского бассейна, влияние Большого Кавказа на систему артезианских бассейнов Восточного Предкавказья чувствуется только на первых десятках километров и т. д.

Одновременно для всех бассейнов, по которым имелись данные, были выполнены расчеты скорости движения подземных вод. На основании этих расчетов делались выводы о скорости водообмена, о продвижении флюидов из одной области в другую и органического вещества из нефтематеринских областей в области нефтенакопления и о нефтеносности в части как обнаружения месторождений углеводородов, так и прогнозирования их запасов.

Почти одновременно стали появляться работы противоположного толка, отвергающие или ограничивающие возможность приме-

нения этой методики. Чтобы понять суть спора, необходимо сказать несколько слов о существе метода.

Как уже отмечалось, А. И. Силин-Бекчурин определил приведенный напор как потенциальную функцию тока, то есть функцию, определяющую движение подземных вод. Предложенная им расчетная формула учитывала изменения плотности ρ подземных вод и гипсометрическое положение водоносного слоя. В одной из своих работ А. И. Силин-Бекчурин указал, что предложенный им метод справедлив только в том случае, если границы раздела вод разной плотности горизонтальны или, что то же, $\partial\rho/\partial x=0$ в любой точке исследуемой области. Попутно отметим, что этого условия тоже недостаточно. Надо еще, чтобы $\partial\rho/\partial z\geqslant 0$ (ось z направлена вниз). Введение этого ограничения объясняется тем, что в противном случае вся система окажется механически неравновесной в поле тяготения независимо от приложенных внешних сил.

Вначале большинство исследователей, не учитывая это ограничение, применяли метод гидродинамических расчетов в любых условиях. Впоследствии одни специалисты указывали, что в природных условиях упомянутое ограничение не выполняется, и поэтому применение этого метода невозможно. Другие исследователи пытались отыскать такую методику, которая была бы применима и для условия $\partial\rho/\partial x\neq 0$, т. е. пригодную для любого изменения плотности воды в пространстве без ограничений. Здесь интерес вызывают исследования И. И. Крашина [29]. Он отмечает, что неоднозначность решения фильтрационных задач с использованием приведенных напоров объясняется непотенциальностью течения в реальных природных средах ($\partial\rho/\partial(x, y)\neq 0$) и постулирует, что радикальное изменение положения возможно при использовании данных о пластовых давлениях и применении дифференциальных уравнений, описывающих процессы фильтрации жидкости с учетом изменения ее плотности и вязкости.

Если под неоднозначностью понимать различие в относительных величинах приведенных напоров в зависимости от выбранной плоскости сравнения, то, как справедливо отмечает А. Е. Гуревич [1], это различие связано в основном с тем, что неправильно задается закон изменения плотности воды с глубиной. Другое дело, если неоднозначная картина получается при изменении пути приведения. Тогда это прямо свидетельствует об изменении ρ в горизонтальном направлении и невозможности применения метода приведенных напоров, если эта неоднозначность существенна *.

А. Е. Гуревич предлагает оценивать эту неоднозначность через неопределенность интеграла в формуле приведения [11]. Нам это представляется неправомерным. Чем больший район мы возьмем и чем сложнее в данном бассейне гидрохимическая обстановка,

---

* Для глубоких частей большинства артезианских бассейнов эта неоднозначность обычно невелика, если не объединять структурно разобщенные области.

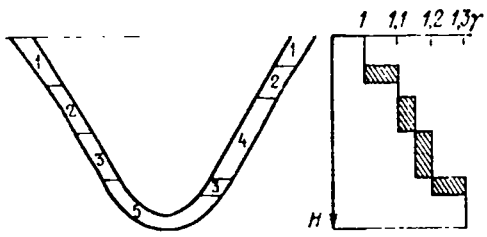


Рис. 4. Схема к раскрытию неопределенности (заштрихована). *По А. Е. Гуревичу.*

Плотность воды, кг/м³: *1* — 1; *2* — 1,1; *3* — 1,2; *4* — 1,15; *5* — 1,3

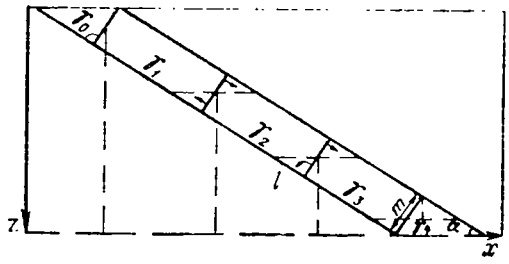


Рис. 5. Схема «тонкого пласта»

тем больше будет рассчитанная по его методу неопределенность. Однако всегда можно выбрать некоторую область, где метод окажется, с точки зрения А. Е. Гуревича, применимым, и таких областей может оказаться сколь угодно много. Но и при объединении их можно получить отрицательный результат, из чего следует, что исследуемая область скорее всего разобщена; в ней существует несколько гидрогеологических районов с различными условиями формирования полей минерализации и пластовых давлений. Вообще, принимая для расчетов любой из методов, основанных на определении функции $\gamma=f(z)$ для всей области, мы почти всегда будем иметь погрешность, которую можно значительно уменьшить, используя метод последовательного приведения.

Все это легко доказать на примере (рис. 4). В сообщающиеся сосуды налиты жидкости разных плотностей, но с равной общей массой относительно нижней точки. Естественно, что никакого движения происходить не может — система строго равновесна. По А. Е. Гуревичу же, здесь существует какая-то неопределенность — на одних и тех же отметках находятся жидкости разной плотности. Действительно, если пользоваться единым законом изменения плотности с глубиной, так и будет. Если же последовательно приводить давления по «реальному» пути, всякая неопределенность исчезнет. Конечно, для этого необходимо знать закономерность изменения плотности между сравниваемыми точками, для чего достаточно иметь хорошую гидрохимическую и структурную карты изучаемого водоносного горизонта. Попутно заметим, что при приведении давления по линии в тонком пласте не имеет существенного значения невыполнение условия $\partial\rho/\partial x=0$, так как при этом направление движения каждой частицы жидкости может быть противоположным (рис. 5), но на величину массовой скорости по пласту в целом это не будет оказывать влияния, что очень важно.

Несмотря на существенные разногласия между различными исследователями, в главном они единодушны — если существует градиент напора или другая движущая сила, независимо от ее происхождения, то существует и движение подземных вод, причем оно подчиняется законам движения ньютоновских жидкостей (за-

кону Дарси) при любых значениях силы. Для малых уклонов и скоростей, характерных для глубоких частей артезианских бассейнов, этот факт еще пока никем не доказан. Именно этот вопрос и является основным.

Неотектоника и пьезометрическая поверхность

До последнего времени большинство гидрогеологов считало, что тектонические процессы не могут оказывать влияния на современное положение пьезометрической поверхности глубоких подземных вод. Это предположение основывалось на том, что скорости вертикальных тектонических движений земной коры очень малы, и какое бы реальное значение коэффициента пьезопроводности мы ни приняли, релаксация возникающих градиентов должна происходить практически параллельно их образованию. Хотя прямо об этом нигде не говорится, но всегда предполагается упругий закон фильтрации, на основании которого собственно и проводились все расчеты.

В 1970 г. в лаборатории промышленных вод ВСЕГИНГЕО была закончена работа по составлению карты прогнозных эксплуатационных запасов подземных промышленных вод СССР. В процессе работы выявлено, что крупные платформенные поднятия одновременно являются областями наибольших напоров, хотя никак не могут являться областями питания глубоких горизонтов по всем гидрогеологическим показателям (например, Токмовский свод Русской платформы). Возник вопрос, какими же причинами было вызвано это явление.

На рис. 6 показано изменение по профилю Йошкар-Ола—Туймазы — Уфа амплитуды новейших тектонических движений и приведенных напоров верхне-среднедевонского водоносного горизонта. На рис. 6 видно, что обе кривые располагаются почти параллельно друг другу, особенно в восточной части профиля.

Можно предположить, что при выполнении положений упругой теории фильтрации релаксация градиента в 0,0005, образовавшегося в течение 2—4 млн. лет, должна была полностью завершиться (западная часть профиля). Фактически же градиент приведенной пьезометрической поверхности за этот период уменьшился лишь на 1/3 от градиента тектонических движений. В восточной половине профиля, где градиенты тектонических движений были невелики, форма обеих поверхностей почти полностью совпадает (в пределах точности имеющихся данных), т. е. релаксация уклонов, возникающих в результате тектонических движений, не произошла.

Можно сделать вывод, что в данном районе возникших градиентов недостаточно для начала латеральной фильтрации. Частичную же релаксацию можно объяснить, например, изменением характеристик порового пространства под влиянием изменения эффективного давления в пласте. Эти изменения, по-видимому, происходят весьма медленно и заметно проявляются только в течение

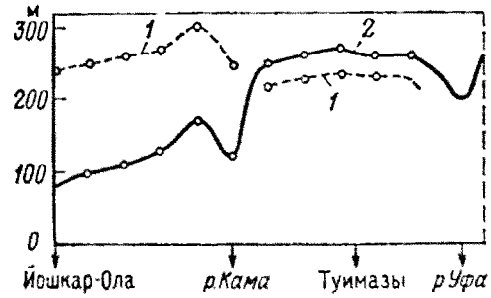


Рис. 6. Схематический профиль Йошкар-Ола — Туймазы — Уфа.

1 — значение приведенных напоров, *2* — амплитуда неотектонических движений

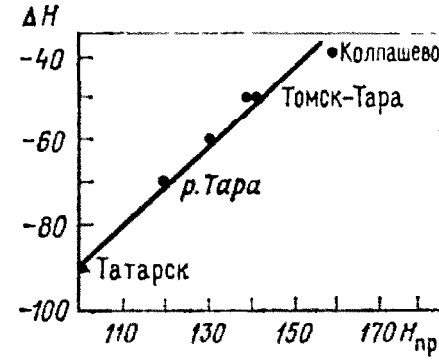


Рис. 7. Соотношение амплитуд неотектонических движений ΔH и приведенных напоров $H_{пр}$

геологического времени. Кроме того, следует отметить, что в различных тектонических районах в зависимости от состава пород, глубины и других факторов разница между приведенными напорами, исчисленными от одной и той же плоскости сравнения, и амплитудами неотектонических движений оказывается существенно различной и сохраняется длительное время (см. рис. 6). Это указывает на то, что поле пластовых давлений в каждом отдельном тектоническом районе формируется независимо, и при небольших уклонах, характерных для рассматриваемой природной обстановки, водообмен между ними в естественных условиях не происходит.

Аналогичный вывод получается и при рассмотрении района Татарск — Томск — Тара — Колпашево на юге Западной Сибири (рис. 7). На графике видно, что для любых двух точек градиент приведенных напоров равен градиенту амплитуд неотектонических движений, что также свидетельствует о застойном режиме. Нами специально выбраны районы и горизонты со сравнительно небольшими амплитудами движений с целью исключить или ослабить влияние изменения эффективного давления $P_{эф}$. При больших изменениях $P_{эф}$ будут фиксироваться другие эффекты — образование зон АВПД, АНПД и др.

Если высказанные положения верны, а для описанных районов они не вызывают сомнений, то следует признать, что подземные воды глубокозалегающих горизонтов в целом обладают достаточно выраженными реологическими свойствами, и для приведения их в движение нужно приложить определенную силу (создать определенный дополнительный градиент напоров), обусловленную наличием начального градиента фильтрации. Причем его величина должна быть не меньше $5 \cdot 10^{-4}$ *. Такие градиенты ха-

* Ю. П. Гаттенбергер [8], анализируя наличие или отсутствие «тылового» и «лобового» эффекта на ряде нефтяных месторождений Западной Сибири, также пришел к выводу, что при $i = n \cdot 10^{-4}$ фильтрация подземных вод не обнаруживается.

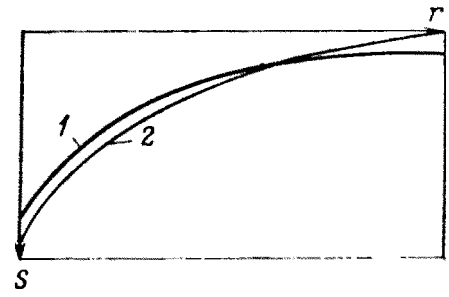


Рис. 8. Схема депрессионной воронки.
1 — при отсутствии начального градиента фильтрации; *2* — при его наличии

рактерны для глубоких частей большинства седиментационных бассейнов и, следовательно, латеральная фильтрация носит ограниченный характер, проявляясь лишь там, где по той или иной причине создаются значительные градиенты напоров*.

Вероятно, выше начального градиента существует некоторый диапазон градиентов, где движение подземных вод, хотя и существует, но не подчиняется закону Дарси, лежащему в основе практически всех расчетных формул и методов гидродинамики. Не исключено, что в этом диапазоне скорость зависит не только от приложенной силы, но и времени ее воздействия, хотя последнее на современном этапе пока из области предположений.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что на современном этапе произвести гидродинамические расчеты скорости движения подземных вод в глубоких частях артезианских бассейнов не представляется возможным независимо от того, используются ли для этого приведенные напоры или методы, предлагаемые И. И. Крашиным [29], А. Е. Гуревичем [11] или другими исследователями. Никаких преимуществ в этом смысле не дает и метод математического моделирования, так как для природных сред мы не знаем ни начальных градиентов, ни законов движения подземных вод при малых скоростях. Особенно это относится к региональным построениям, так как в разных структурных элементах поля пластовых давлений (и приведенных напоров) могут вести себя достаточно независимо (рис. 8).

Вероятно, единственными путями гравитационного движения подземных вод в глубоких частях артезианских бассейнов остаются ослабленные зоны повышенной проницаемости (разломы и др.), да и те, по-видимому, служат в основном путями вертикальной миграции, так как в естественных условиях вертикальные градиенты значительно больше горизонтальных. Количество перетекающих по ним вод, исходя из высказанных положений, должно быть весьма мало, а устойчивость и локализация связанных с ними гидрохимических аномалий вполне объясняются отсутствием или чрезвычайной замедленностью латеральной фильтрации.

Однако из изложенного не следует, что необходимо отказаться от построения карт приведенных напоров. Постулируя невозможность их использования для гидродинамических расчетов, мы тем

* Этот факт свидетельствует в пользу седиментационной гипотезы происхождения глубоких подземных вод.

не менее считаем их чрезвычайно полезными для качественного анализа гидрогеологических условий того или иного региона, особенно в сочетании с картами сопоставления напоров и гидрогеохимическими картами.

Как уже сказано, в древних породах поле пластовых давлений является во многом унаследованным и, следовательно, относительные напоры на поднятиях будут выше, чем во впадинах, что создает ложное впечатление о наличии области питания в пределах первых и области разгрузки в пределах вторых. При небольших амплитудах движений и достаточной пластичности слагающих пород этот процесс не вызывает заметных изменений свойств пород-коллекторов. Возможно лишь некоторое уплотнение глинистых отложений во впадинах, что, с одной стороны, несколько повысит там пластовое давление, а с другой — может ухудшить условия гидравлической взаимосвязи горизонтов. Другое дело, если движения достаточно интенсивны, а слагающие водоносный пласт породы представлены твердыми и хрупкими разностями. Для приведения в действие механизма поднятия необходимо усилие, превышающее геостатическое давление, так как требуется энергия на преодоление сопротивления вышележащих пород изгибу, растяжению и т. д.

В условиях затрудненного оттока жидкости в водоносном пласте развиваются значительные напряжения, и пластовое давление в определенных условиях может даже превысить геостатическое. Высокие пластовые давления и наличие воды могут создать условия для естественного гидроразрыва пластов, в первую очередь в направлении действия наибольшей сжимающей силы (в связи с неравенством главных напряжений). Этот разрыв, естественно, произойдет в наиболее ослабленных частях — зонах растяжения и зонах тектонических нарушений, в результате чего образуются зоны вторичной трещиноватости, а по зонам тектонических нарушений — каналы связи между горизонтами или с поверхностью.

Разрыв сплошности сопровождается падением пластового давления, что приводит к закрытию части вновь образованных трещин и сохранению более крупных из них в направлении наибольшего напряжения (обычно субвертикальных). При образовании устойчивых зон разгрузки создается область пониженных давлений, неустойчивых — повышенных (по сравнению с условным гидростатическим). В любом случае в пределах поднятия образуется область повышенной проницаемости, особенно на крыльях складки, где растягивающие усилия максимальны. Этот факт подтверждается многочисленными натурными наблюдениями.

Таким образом, крылья антиклинальных складок являются наиболее рациональным местом для заложения водозаборных скважин (по всем показателям). Формирование пластовых давлений и проницаемости в молодых слабо литифицированных породах происходит несколько иначе, чем это описано выше. Как и в первом случае, рост антиклинальной складки требует приложения значительных усилий. Результатом этого процесса будет сжатие

глинистых прослоев и выдавливание воды из них. Поскольку большинство складок являются унаследованными и отличаются повышенной песчанистостью (а следовательно, и проницаемостью) пород, отток воды в прилегающие впадины будет затруднен, вследствие чего образуются зоны АВПД. Рост антиклинальных складок обычно сопровождается компенсированным прогибанием прилегающих участков с соответствующим накоплением осадков. Это приводит к увеличению эффективного давления, отжатию воды из глин и соответствующим увеличениям пластовых давлений. Именно по этой причине для таких условий характерно повышенное пластовое давление по всей области распространения глубоких водоносных горизонтов. Важно при этом отметить, что соотношения напоров во впадинах и поднятиях зависят от многих причин, но в любом случае напоры подземных вод на поднятиях не могут характеризовать средние условия для бассейнов в целом. Поэтому построение гидродинамических карт по данным, полученным только на поднятиях, может дать искаженную гидродинамическую картину бассейна.

Важно отметить, что и в этих условиях максимальные сжимающие напряжения приурочены к ядру складки. Поэтому здесь иногда происходит сильное уплотнение пород и ухудшение их фильтрационных свойств по сравнению с крыльями. Последнее необходимо учитывать при проведении разведочных работ.

В результате значительного повышения пластового давления, как и в вышеописанном случае, может произойти естественный гидроразрыв пластов в наиболее ослабленных зонах, что приведет к оживлению старых разрывных нарушений. Заметим, что этот механизм может привести к разрыву сплошности даже весьма пластичных пород, которые бы в противном случае просто компенсированно изогнулись. Указанный процесс является одной из причин образования многочисленных разноамплитудных разломов различной длины и простирания, захватывающих только часть мощности осадочных пород.

Интересно, что несмотря на низкую прочность пород и относительно высокую пластичность, открытые разломы существуют в течение длительного времени, осуществляя гидравлическую связь между различными горизонтами подземных вод, а иногда образуя устойчивые зоны разгрузки в виде восходящих источников. Причиной этого, вероятнее всего, является неравенство главных нормальных напряжений, вследствие чего давление воды способно удержать разлом в раскрытом состоянии. Это усугубляется тем обстоятельством, что, как уже отмечалось, пластовые давления на поднятиях обычно бывают повышенными.

В заключение отметим, что если тектонические силы действуют не вертикально, то и направление зон разрывов и трещин также будет отклоняться от вертикального направления. Подобное явление встретилось при проходке Кольской сверхглубокой скважины, где на глубинах свыше 5 км под давлением надвигающегося по шарьяжу блока образовалась мощная зона вторичной трещи-

новатости в субгоризонтальном направлении, причем геостатическая нагрузка оказалась недостаточной для закрытия этих трещин. Правда, для условий платформ, предгорных и межгорных впадин на глубинах до 5 км этот случай является сравнительно редким. Обычно же образуются субвертикальные трещины, в том числе в уплотняющихся глинах. В этих условиях вертикальная фильтрация становится преобладающей, а латеральная охватывает лишь ограниченные области.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕГИОНАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Изучение закономерностей распределения напоров подземных вод в глубоких частях крупных артезианских бассейнов имеет большое значение при анализе условий формирования и оценке перспектив использования подземных вод. Такое изучение дает возможность обосновать расчетную гидрогеологическую схему для подсчета запасов, оценить устойчивость или закономерности изменения химического состава подземных вод в процессе эксплуатации их водозаборами, увязать особенности гидрогеохимической зональности с динамикой подземных вод глубоких горизонтов. Необходимость изучения региональной гидрогеодинамики возникает при разработке проблем формирования химического состава и особенно ресурсов подземных вод, проблем миграции углеводородов и образования их залежей, при решении вопросов захоронения в глубокие горизонты промышленных стоков, а также охраны недр и рационального использования полезных ископаемых.

Впервые понятие о приведенном напоре как потенциальной функции фильтрационного потока было сформулировано А. И. Силиным-Бекчуриным. Движение жидкостей с разной плотностью, происходящее за счет неравновесного распределения плотности подземных вод и выражаемое через приведенное давление, описывается уравнением вида:

$$P = p + \int_{z_0}^{z} g\gamma(z)\,dz, \qquad (1)$$

где P — приведенное давление; p — давление пластовых вод в точке z; $\gamma(z)$ — изменение плотности подземных вод по вертикали от горизонтальной плоскости сравнения с координатой z_0; g — ускорение свободного падения. А. И. Силин-Бекчурин отметил, что предложенный им метод справедлив только в том случае, если $\partial\gamma/\partial x = 0$ в любой точке исследуемой области. Уравнение (1) предполагает также необходимость соблюдения условия $\partial\rho/\partial z \geqslant \geqslant 0$. Введение последнего ограничения объясняется тем, что в противном случае вся система окажется практически неравновесной в поле тяготения независимо от приложенных внешних сил.

Первоначально большинство исследователей, не принимая во внимание этого ограничения, применили указанный метод для гидродинамического анализа в любых гидрогеологических условиях. Впоследствии некоторые специалисты, подчеркивая, что в природ-

ных условиях упомянутое ограничение не выполняется, стали полностью отвергать или существенно ограничивать возможности применения метода.

Как указывалось выше, полный анализ применимости формулы А. Н. Силина-Бекчурина выполнен А. Е. Гуревичем. Указывая, что в реальных природных условиях ограничения, предусматривающие постоянство плотности воды ρ в горизонтальной плоскости и прямолинейную зависимость изменения ее с глубиной, не соблюдаются, он доказывает, что метод приведенных давлений можно использовать лишь тогда, когда разница давлений между двумя сравниваемыми точками больше, чем неопределенность интеграла в формуле (1), т. е. когда.

$$\Delta P_{z_1}^{z_2} > \operatorname{indef} I_{z_1}^{z_2} + 2\delta\rho, \qquad (2)$$

где $\Delta P_{z_1}^{z_2} = P_1 = P_2 = P_1 + P_2 + \int_{z_1}^{z_2} \rho(z)\,dz$ — разность приведенных давлений P_1 и P_2 в двух точках; P_1 и P_2 — фактические давления в скважинах; $\operatorname{indef} I_{z_1}^{z_2} = \max \int_{z_1}^{z_2} \gamma(z)\,dz - \min \int_{z_1}^{z_2} \gamma(z)\,dz$ отражает величину неопределености интеграла, зависящей от пути интегрирования, т. е. от величины отклонения ρ от какой-либо кривой $\gamma(z)$ линии (в частном случае прямой); $2\delta\rho$ — погрешность, связанная с неточностью определения пластового давления в скважинах. По А. Е. Гуревичу, неравенство (2) гарантирует лишь правильное определение направления перепада давлений и (при наличии проницаемости) приближенного общего направления движения подземных вод.

В том случае когда метод приведенных давлений использовать нельзя, А. Е. Гуревич предлагает непосредственно определять величину и направление вектора движущей силы $(-\nabla p + \gamma\bar{g})$ и вектор скорости фильтрации:

$$\bar{v} = \frac{k}{\mu}(-\nabla p + \gamma\bar{g}).$$

Движущая сила $(-\nabla p + \gamma\bar{g})$ является гравитационной и состоит из двух слагаемых, одно из которых при прочих равных условиях определяется значениями давлений на границах изучаемой области фильтрации, второе — неравновесным распределением плотности фильтрующихся жидкостей.

Применение этого способа имеет ряд ограничений, касающихся обоснования выбора точек, между которыми производятся расчеты: 1) в пределах расчетной области значения плотности жидкости, пористости и проницаемости водовмещающих пород должны меняться незначительно; 2) точки должны быть удалены от границ с резкими изменениями потока подземных вод. Следует отметить, что расчеты по формуле (2) весьма трудоемки и практически осуществляются лишь с использованием электронной вычислительной техники.

Анализируя условия применения для изучения движения подземных вод метода приведенных давлений, Л. В. Боревский обращает внимание на то обстоятельство, что чем больший гидрогеологический район изучается и чем сложнее в этом районе гидрогеохимическая обстановка, тем больше будет рассчитанная по формуле (2) неопределенность. Однако всегда можно выбрать некоторую область, где метод приведенных давлений окажется, с точки зрения А. Е. Гуревича, применимым, и таких областей может оказаться сколько угодно. Из этого следует, что исследуемая водонапорная система скорей всего разобщена и что в ней имеется несколько гидрогеологических районов с различными условиями формирования полей минерализации (плотности жидкости) и пластовых давлений. В таких случаях, принимая любой из методов, основанный на определении функции $\rho=f(z)$ для всей исследуемой системы, мы почти всегда будем получать значительную погрешность. Эту погрешность можно уменьшить или практически исключить, используя метод последовательного приведения.

Как известно, в качестве решения уравнения (1) А. И. Силин-Бекчурин предложил формулу

$$P_{\text{п}} = P + \frac{z}{10} \cdot \frac{\gamma_0 + \gamma}{2}, \tag{3}$$

где $P_{\text{п}}$ — приведенное давление в рассматриваемой точке водоносного горизонта; P — пластовое давление в той же точке; z — расстояние от исследуемой точки до выбранной плоскости сравнения; γ — объемная масса воды в исследуемой точке; γ_0 — объемная масса воды на плоскости сравнения.

Из формулы видно, что она выведена из предположения, что объемная масса воды связана с глубиной прямолинейной (или весьма близкой к ней) зависимостью.

Однако строгая зависимость (любой формы проявления) объемной массы воды от глубины залегания водоносных пород обычно отсутствует. Поэтому рассчитанные по формуле (3) приведенные давления будут неточными, что и отмечалось выше. Для исключения этих погрешностей и обеспечения возможности гидродинамических построений С. С. Бондаренко предложил [2, 16]: а) расчеты приведенных давлений производить последовательно от одной скважины к другой (рис. 9); б) плоскость сравнения выбирать для каждого обособленного водоносного горизонта или комплекса на абсолютной отметке его наиболее погруженной части. Для этого случая предложена формула:

$$P_{\text{п}} = P + \frac{z_1}{10} \cdot \frac{\gamma_0 + \gamma_1}{2} + \frac{z_2 - z_1}{01} \cdot \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} + \ldots + \frac{z_n - z_{n-1}}{10} \cdot \frac{\gamma_{n-1} + \gamma_n}{2}, \tag{4}$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_n$ — объемная масса воды в расчетных точках (скважинах) 1, 2, 3, ..., n; $z_1, z_2, \ldots, z_n$ — расстояния от исследуемых точек до плоскости сравнения.

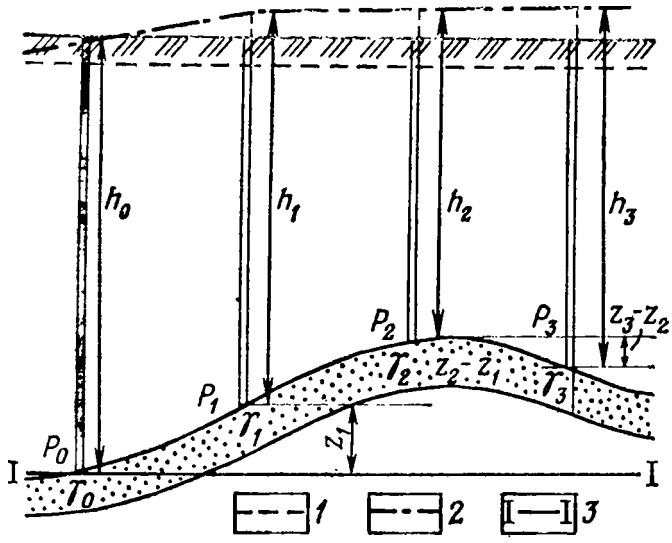


Рис. 9. Схема для расчетов приведенных давлений и напоров.

1 — уровень воды в скважинах; *2* — приведенный уровень; *3* — плоскость сравнения

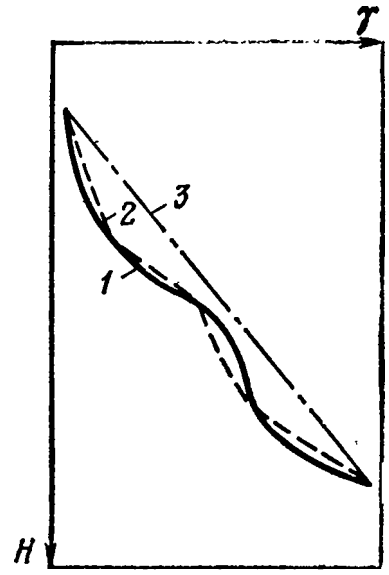


Рис. 10. График зависимости $\gamma(H)=f(H)$.

Изменение плотности воды с глубиной: *1* — фактическое; усредненные: *2* — по формуле (4); *3* — по А. И. Силину-Бекчурину

В более общем виде формула (4) может быть описана следующим образом:

$$P_{\text{п}} = P + \sum_{1}^{n} \frac{\Delta z_i}{10} \cdot \frac{\gamma_{i-1} + \gamma_i}{2} \qquad (5$$

или

$$H_{\text{п}} = h_n \cdot \gamma_n + \sum_{1}^{n} \Delta z_i \cdot \frac{\gamma_{i-1} + \gamma_i}{2} \; . \qquad (6)$$

Формула (4) также исходит из прямолинейной зависимости между плотностью воды и глубиной, однако осреднение параметров, характеризующих подземные воды, производится здесь для двух соседних скважин (или точек наблюдения), а не для всего пласта в целом (рис. 10). Практически она может с допустимой погрешностью использоваться для случая произвольного распределения объемного веса в пласте при достаточно большом количестве точек наблюдения (скважин).

Чаще удобнее пользоваться не приведенными давлениями, а приведенными напорами, характеризующимися высотой столба пресной воды с $\gamma=1$. В этом случае $H_n=10\cdot P_n$, где H_n — приведенный напор.

Так как непосредственное измерение пластовых давлений P производится далеко не всегда и, кроме того, применяемые глу-

бинные манометры имеют недостаточную точность, пластовые давления, а следовательно, и гидростатический напор могут быть определены по формуле

$$P = \frac{1}{10} h\gamma + P_{изб},$$

где h — столб воды в скважине; γ — средняя объемная масса воды в стволе скважины; $P_{изб}$ — избыточное давление на устье скважины.

Единственную сложность представляет определение средней объемной массы жидкости в стволе скважины. Изменение последнего по стволу обусловлено тремя причинами: изменением температуры, выделением газа и увеличением с глубиной давления, то есть сжатием жидкости. Влияние выделяющегося газа обычно исключается путем постепенного стравливания газовой шапки перед замером статического уровня (давления) до полной дегазации столба воды в скважине. Остальные факторы могут быть учтены теоретически.

Пластовое давление с учетом сжимаемости жидкости можно определить по несколько преобразованной формуле Н. А. Плотникова:

$$P = E\sqrt{E^2 - 2E\left[\gamma h + P_п + 1 - \left(\frac{P_п + 1}{2E}\right)\right]^2}, \qquad (7)$$

где E — модуль упругости жидкости в скважине, $E = \frac{1}{\beta_ж}$; $\beta_ж$ — коэффициент упругости жидкости; γ — объемная масса воды у статического уровня. Зная P, по формулам (3) или (4) можно определить $P_п$, а по формуле (5) — $H_п$.

Несмотря на кажущуюся простоту, формула (7) все же весьма неудобна для практических расчетов, так как требует очень высокой точности в исчислении подкоренного выражения и извлечения корня. Поэтому гораздо удобнее использовать более простой способ, предложенный Л. В. Боревским [16], который позволяет при любом давлении выразить пластовое давление с учетом сжимаемости (с точностью не менее 0,03 % при $P \leqslant 50$ МПА) следующим образом:

$$P = P_и + h \cdot \gamma_{ср} = P_и + h\gamma_0 \frac{1 + \beta P_и}{1 - 0{,}5\beta h\gamma_0}, \qquad (8)$$

где $P_и$ — избыточное давление на устье.

По сравнению с формулой (7) расчеты по (8) дают отклонение в тысячные и сотые доли процента, но (8) не требует слишком высокой точности вычислений. Если не учитывать изменение плотности воды под влиянием ее сжатия, то рассчитанное пластовое давление будет на 0,4—0,6 % меньше истинного (при глубинах 1500—2500 м). В большинстве случаев этой погрешностью можно пренебречь, поскольку во всех скважинах она будет однозначной.

Известно, что с повышением температуры плотность воды уменьшается. Известно также, что в большинстве простаивающих скважин термограмма представляет собой близкую к прямой линию с уклоном, равным температурному градиенту в изучаемом районе. Для получения средней плотности воды по стволу скважин необходимо проинтегрировать изменение температуры в пределах от $t_у$ (температура на уровне нейтрального слоя) до $t_п$ (пластовая температура). Однако отмеченное выше обстоятельство позволяет воспользоваться следующим приближенным равенством:

$$\gamma_{ср} = (\gamma_у + \gamma_{пл})/2. \quad (9)$$

Погрешность в вычислении $\gamma_{ср}$ по формуле (9) по сравнению с точным интегральным решением не превышает 0,30—0,35 %. Несколько более точное решение может быть получено при определении плотности как функции температуры:

$$\gamma_{ср} = \gamma_{(t_{ср})}, \quad (10)$$

где $t_{ср}$ — средняя температура в стволе скважины, которая равна $t_{ср} = (t_у + t_{пл})/2$. При расчетах $\gamma_{ср}$ по формуле (10) погрешность не превышает 0,05—0,06 %.

При построении карты изолиний приведенных напоров следует придерживаться следующих правил, несоблюдение которых может привести к погрешностям в построении и, как следствие этого, к неправильным выводам относительно характера и направления движения подземных вод: а) плоскость сравнения целесообразно выбирать на отметке самой погруженной части данного водоносного горизонта; б) приведенные напоры определяются последовательно в каждой скважине выбранного профиля, начиная с самой глубокой; в) между двумя скважинами одного профиля в пласте не должно быть больших поднятий или депрессий.

Изложенная методика гидродинамических построений использовалась при изучении гидрогеологических условий Ангаро-Ленского бассейна (Г. Я. Богданов, С. С. Бондаренко), Преддобруджского прогиба (В. В. Перцовский, Г. Я. Богданов), Волго-Камского бассейна (А. Т. Печерин) и др. Во ВСЕГИНГЕО она была принята для гидродинамических построений при оценке прогнозных эксплуатационных запасов промышленных вод СССР. Однако при этом потребовалась предварительная проверка точности определения приведенных уровней, выполненная Л. В. Боревским исходя из следующих предпосылок.

Используя изложенный выше метод, зависимость между плотностью воды и глубиной можно выразить не уравнением прямой, как принято в формуле (4), а уравнением

$$\gamma_{(z)} = \gamma_0 + az^b, \quad (11)$$

где a и b — коэффициенты, определяемые фактическими данными. Используя зависимость подобного вида, можно в свою очередь достаточно точно описать любую кривую на участке, где функция

убывает или возрастает монотонно и не происходит перегиба кривой и, следовательно, перемены знака второй производной.

Для получения приведенного напора в любой точке пласта достаточно проинтегрировать уравнение (11), подставив в него соответствующие значения $\gamma(z)$ и используя полученное выражение в формуле (5):

$$P_{\text{п}} = P + \frac{1}{10}\gamma_0 z + \frac{1}{10}\frac{az^{b+1}}{b+1}. \qquad (12)$$

Для определения коэффициентов a и b необходимо иметь значения для трех точек пласта, включая плоскость сравнения. После преобразований имеем:

$$b = \frac{\lg\frac{\gamma_0 - \gamma_1}{\gamma_0 - \gamma_2}}{\lg\frac{z_2}{z_1}}; \qquad (13)$$

$$a = \frac{\gamma_1 - \gamma_0}{z^b}, \qquad (14)$$

а подставляя (17) и (18) в формулу (16), получим

$$P_{\text{п}} = P + \frac{z}{10}\gamma_0 + \frac{z}{10}\frac{\gamma - \gamma_0}{b+1}, \qquad (15)$$

где γ — плотность воды на расстоянии z от плоскости сравнения. или

$$P_{\text{п}} = P + \frac{z}{10}\gamma_{\text{ср}},$$

где $\gamma_{\text{ср}} = (b\gamma_0 + \gamma)/(b+1)$; $\gamma_{\text{ср}}$ — средняя плотность воды между плоскостью сравнения и сечением z. При $b=1$ формула (15) аналогична формуле (3).

Результаты выполненных Л. В. Боревским расчетов и сопоставление построений, приведенные на рис. 11, свидетельствуют, что примененная при построениях карт методика является достаточно точной для практических расчетов и гидродинамических построений при изучении глубоких подземных вод крупных артезианских бассейнов.

Выяснение энергетических условий гидравлической взаимосвязи водоносных комплексов можно производить на основании попарного сопоставления напоров подземных вод соседствующих в разрезе водоносных комплексов, определенных в одном пункте опробования. Приведенные напоры, исчисленные от разных плоскостей сравнения, несопоставимы.

Пусть в скважине раздельно опробованы два водоносных горизонта (комплекса), разница в глубинах залегания которых практически равна мощности разделяющих эти водоносные горизонты водоупорных или слабопроницаемых отложений (рис. 12).

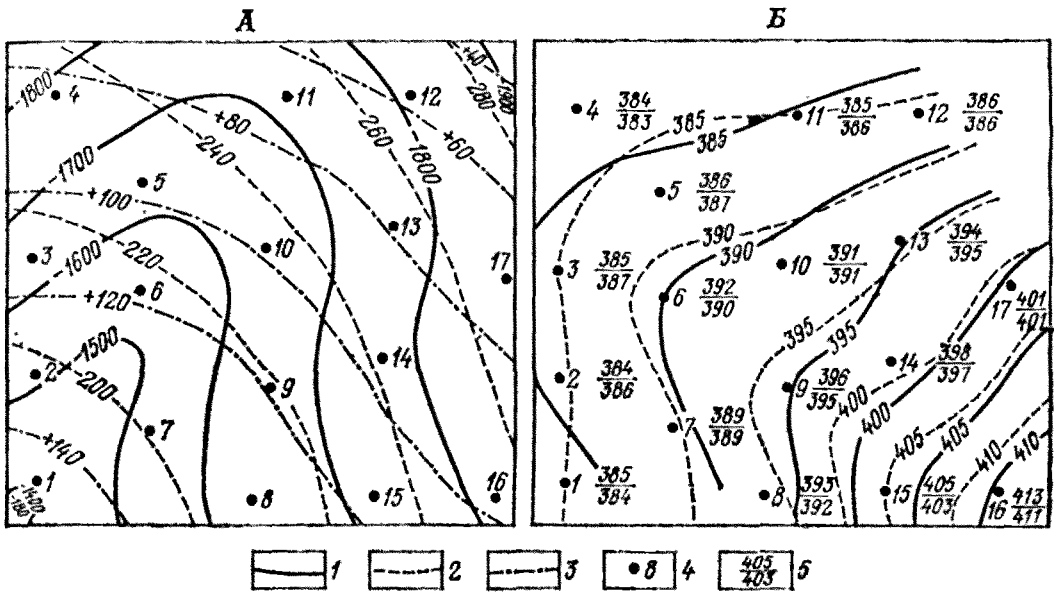


Рис. 11. Построение гидрогеологической карты (*А*) и приведенных напоров (*Б*).

1 — изострата кровли водоносного горизонта в абсолютных отметках; *2* — изолинии минерализации подземных вод, г/л; *3* — уровень воды в абсолютных отметках; *4* — скважина и ее номер; *5* — значения приведенных напоров, вычисленные по формулам (19) — в числителе и (3) — в знаменателе

В верхнем горизонте вскрыты подземные воды плотностью γ_1 и высотой напора минерализованных вод h_1, в нижнем соответственно γ_2 и h_2. Напоры вод каждого горизонта, приведенные к плотности пресной воды, в точках опробования А и В можно выразить формулами $H_1 = h_1\gamma_1$ и $H_2 = h_2\gamma_2$.

Для того чтобы воды нижнего горизонта достигли верхнего, им надо подняться на высоту m; потеря напора при этом составит $m(\gamma_1+\gamma_2)/2$; в этом случае напор второго горизонта, приведенный к точке опробования первого, составит:

$$H_2^1 = h_2\gamma_2 - m\frac{\gamma_1+\gamma_2}{2}.$$

Разница приведенных таким образом напоров сравниваемых водоносных комплексов равна $\Delta H = H_2^1 - H_1$, или

$$\Delta H = H_1 - H_2 - m\frac{\gamma_1+\gamma_2}{2}.$$

Важное значение для исследования условий формирования глубоких подземных вод имеет изучение направления и скорости их движения, интенсивности водообмена и баланса глубоких подземных вод в водонапорных системах.

Если обеспечиваются условия применимости закона Дарси, реальные скорости движения подземных вод по основным направ-

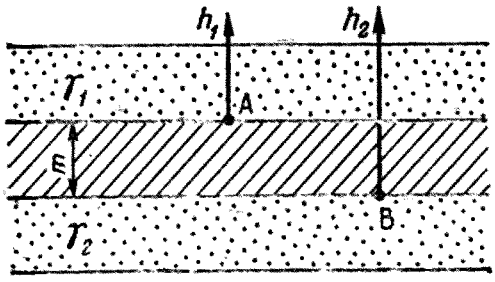


Рис. 12. Схема сопоставления напоров соседних водоносных горизонтов

лениям регионального подземного стока могут быть определены по формуле

$$u = \frac{k\,\Delta H}{nL}, \qquad (16)$$

где k — коэффициент фильтрации; ΔH — перепад приведенных уровней на рассматриваемом участке подземного потока; L — расстояние между крайними точками рассматриваемого участка; n — пористость пород.

Время движения подземных вод на каком-либо участке L по направлению потока определяется по формуле $t = L/365u$.

Таким образом, приведенная выше методика позволяет производить гидродинамическое построение с целью достоверного определения направления подземного стока и распределения приведенных давлений (напоров) в пределах гидрогеологических структур, а также однозначно судить о соотношении приведенных напоров соседних горизонтов в различных частях этих структур и, следовательно, выявить возможные районы и направления межпластовых перетоков подземных вод. Гораздо сложнее дать количественную оценку скорости подземного стока и межпластовых перетоков через слабопроницаемые разделяющие толщи. Формула (16) справедлива для случаев, когда фильтрация подземных вод подчиняется законам движения ньютоновских жидкостей (закону Дарси) при любых значениях движущей силы (в данном случае градиентов напора). Однако это положение для малых гидравлических уклонов и скоростей движения фактически не доказано; в ряде случаев вызывает сомнение факт наличия движения подземных вод в глубоких частях крупных артезианских бассейнов при малых гидравлических уклонах, достоверно устанавливаемых путем гидродинамических расчетов и построений.

Если вытекающие из анализа фактического материала положения верны, то следует признать, что подземные воды глубоких горизонтов обладают достаточно выраженными реологическими свойствами, и для приведения их в движение необходимо приложение определенной силы (создание дополнительного градиента напоров), равной или превышающей для конкретных условий начальный градиент фильтрации. Для рассмотренных Л. В. Боревским регионов эта величина составляет не менее $5 \cdot 10^{-4}$.

Подобные градиенты напоров характерны для глубоких горизонтов большинства крупных артезианских бассейнов; это дает основание полагать, что латеральная фильтрация подземных вод в таких зонах носит ограниченный характер, проявляясь отчетливо лишь там где имеют место значительные градиенты напоров. Это должно учитываться при расчетах скоростей фильтрации и водообмена и региональных гидродинамических построений.

Приведенные выше соображения касаются движения подземных вод лишь под действием гравитационных сил. Однако глубокие водоносные горизонты представляют сложные термодинамические системы, массоперенос в которых может осуществляться под действием других факторов: градиентов температур, концентраций растворенных веществ и т. д. Наиболее полная математическая модель, учитывающая совокупность факторов массопереноса, предложена Н. А. Огильви. На основе теории взаимосвязанных процессов им вводится понятие обобщенного термодинамического потенциала компонента в горной породе, под которым в данном случае понимается открытая термодинамическая система с неразрывной связью минерального скелета породы и насыщающих поровое пространство водных растворов.

Выведенные им системы уравнений являются аналогами уравнений для феноменологического описания взаимосвязанных потоков в термодинамике необратимых процессов. В частности в них входит величина, характеризующая перемещение горных пород, которое может быть связано с неотектоническими движениями, перемещениями отдельных блоков пород, просадочными явлениями и реологическими деформациями, оползневыми процессами и т. д. Даже очень медленные движения скелета пород оказываются соизмеримыми со скоростями движения воды в глубоких частях крупных водонапорных систем, что заставляет учитывать их при региональном анализе гидродинамических полей.

Использование модели движения взаимосвязанных потоков массы различной физической природы требует определения большого числа коэфициентов для феноменологического описания процессов фильтрации и переноса растворенных в воде веществ, а также процессов переноса тепла. Следствием этого является практическое использование различных приближений, хотя принципиально экспериментальное определение величин этих коэффициентов (с различной степенью точности) в настоящее время возможно.

Для подземных растворов, обладающих не слишком большой минерализацией, и при их фильтрации в относительно хорошо водопроницаемых породах можно считать, что движение подземного водного раствора происходит как одно целое, не распадаясь на самостоятельные движения различных составных частей этого раствора. На основе такого допущения для плотностей любого растворенного в воде компонента плотность потока будет пропорциональна массовой доле воды и этого компонента, а простейшей моделью этого приближения является закон Дарси.

Второе приближение имеет место, если для плотностей потоков растворенных веществ учитывается не только их конвективный перенос с потоком двигающейся воды, но и диффузионное движение под влиянием сил, обусловленных градиентами концентраций этих веществ. Помимо этого, необходимо учитывать плотность потока тепла, обусловленную конвективным переносом и молекулярной теплопроводностью под влиянием «тепловых сил». В этом

случае учитывается прямое воздействие движущейся воды на потоки растворенного вещества и потоки тепла, и пренебрегается обратным влиянием потоков этих веществ и тепла на движение воды.

Как известно, отношение массы вещества, переносимой конвективным потоком и молекулярной диффузией, определяется критерием Пекле (Pe). С. И. Смирнов выделяет пять режимов переноса, исходя из относительной роли конвективного и диффузионного потоков: 1) $Pe<0{,}4$ — преобладает перенос по механизму молекулярной диффузии; 2) $0{,}4\leqslant Pe\leqslant 5$ — эффекты молекулярного и конвективного переноса соизмеримы; 3) $5\leqslant Pe\leqslant 250$ — основным является перенос по конвективному механизму (механическая дисперсия), на который накладывается перенос по механизму молекулярной диффузии в поперечном к конвективному переносу направлении; 4) $Pe>250$ — преобладает конвективный перенос, молекулярная диффузия ничтожна мала; 5) диффузионный перенос отсутствует, когда закон Дарси теряет силу — течение турбулентное.

В пределах рассмотренных двух приближений находится большинство теоретических и экспериментальных исследований в области энерго- и массообмена в гидрогеологических системах с преобладающим конвективным переносом в пределах зон активного и замедленного водообмена. Задача изучения таких систем заключается в экспериментальном и натурном определении параметров фильтрации флюидов и констант молекулярной диффузии для различных гидрогеологических условий и в последующих региональных построениях с целью исследования закономерностей и процессов распространения и формирования различных типов подземных вод в пределах водонапорных систем. Решение задачи осложняется трудностями оценки констант диффузионного массопереноса, пространственной изменчивостью и неоднородностью гидрогеологических условий, и, как следствие — необходимостью накопления большого статистического материала. Изложенное позволяет сделать следующие выводы и рекомендации, касающиеся региональных гидрогеодинамических построений.

Построение карт приведенных напоров является чрезвычайно важным для изучения общих гидрогеологических условий водонапорных систем. В сочетании с изучением параметров водоносных и региональных водоупорных отложений, картами сопоставления напоров соседствующих водоносных комплексов (или горизонтов) и гидрогеохимическими построениями анализ гидродинамических карт позволяет определить направление подземного стока, установить область питания водоносных горизонтов и выявить зоны и характер разгрузки глубоких подземных вод. В ряде случаев эти карты могут быть использованы для оценки скорости движения подземных вод и интенсивности водообмена в глубоких горизонтах артезианских бассейнов.

При малых уклонах пьезометрической поверхности (при малых градиентах напоров) определение скорости движения подземных

вод затруднительно или невозможно. В этих случаях большое значение имеют определение начальных градиентов напора или пластовых давлений для изучаемых водоносных отложений и сопоставление их с естественными, установленными путем гидродинамических построений, напорными градиентами. Во всех случаях целесообразна хотя бы приближенная оценка возможной интенсивности проявления других (помимо гравитационных) процессов массопереноса, в частности термодинамических и молекулярно-диффузионных.

Динамика подземных вод глубоких горизонтов водонапорных систем во многом определяется геологоструктурными условиями бассейна и литолого-фациальными особенностями водоносных и водоупорных отложений. В связи с этим гидродинамическим построениям должно предшествовать выделение в пределах водонапорной системы обособленных или отличающихся по своему характеру геологических структур и литолого-фациальных зон. Изучение динамики подземных вод целесообразно начинать с построения гидродинамических профилей приведенных напоров; такие профили дадут представление о соотношении полей приведенных напоров в различных геологических структурах и подтвердят или опровергнут возможность построения гидродинамических карт для водонапорной системы в целом. В случае большой мощности водоносного комплекса и наличия вертикальных градиентов напора и плотности подземных вод для гидродинамических построений необходимо использовать данные, характеризующие одну и ту же его часть (кровлю или подошву).

Предложенный метод последовательного приведения напоров (давлений) по формулам (5) и (6) предусматривает: во-первых, учет фактической закономерности изменения плотности воды между двумя точками, а не во всей изучаемой области фильтрации, так как в разных геологических структурах (или частях одной структуры) эти законы могут быть разными и объединение их в один может привести к существенным ошибкам в оценке общих гидрогеологических условий; во-вторых, возможность проверки правильности гидродинамических построений путем расчетов приведенных напоров по замкнутым полигонам в сочетании с расчетами по профилям.

Глава 5

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ

Подземные минеральные, термальные и промышленные воды представляют собой сложные многокомпонентные физико-химические системы, включающие минеральные и органические вещества,

газы, микроорганизмы и формирующиеся в определенных структурно-тектонических, литолого-стратиграфических и термодинамических условиях. Основные запасы таких вод сформированы преимущественно за счет поверхностных (атмосферных и морских) и глубинных (магматических, вулканогенных, метаморфических) растворов, претерпевших определенные преобразования в земной коре в периоды геологической истории. Для оценки их формирования и генезиса в настоящее время широко используются изотопные методы и, в частности, определение содержания изотопов водорода и кислорода.

В составе воды присутствуют три изотопа водорода — ^{1}H, $^{2}H(D)$ и $^{3}H(T)$ и шесть изотопов кислорода — ^{14}O, ^{15}O, ^{16}O, ^{17}O, ^{18}O и ^{19}O, образующих 36 изотопных разновидностей, из которых только 9 включают стабильные изотопы. Последние содержатся в природных водах примерно в следующих концентрациях (в %): $^{1}H_2{}^{16}O$ — 99,73; $^{1}H_2{}^{17}O$ — 0,04; $^{1}H_2{}^{18}O$ — 0,2. Наибольшую роль в геохимических исследованиях природных вод играют отношения стабильных изотопов водорода ($D/H \approx 1/6700$) и кислорода ($^{18}O/^{16}O \approx 1/500$). Радиоактивные изотопы ^{14}O, ^{15}O, ^{17}O, ^{19}O для целей изучения генетических особенностей подземных вод не используются вследствие малой распространенности и весьма короткого времени существования.

Изотопы кислорода ^{18}O и ^{17}O открыты В. Джноком и Х. Джонстоном в 1929 г., водорода (дейтерий) — Г. Юри с сотрудниками в 1932 г. А. И. Бродский и его коллеги в 1937 г. разработали методику раздельного определения изотопного состава кислорода и дейтерия.

Дейтерий и тяжелый кислород отражают геологическую историю молекул воды, поэтому как за рубежом, так и в СССР ведутся широкие исследования названных изотопов. В Советском Союзе результаты изучения изотопного состава природных вод нашли отражение в работах Ф. А. Алексеева, В. Е. Ветштейна, Р. П. Готтих, Л. К. Гуцало, В. Т. Дубинчука, Г. А. Малюка, А. Г. Мирошниченко, В. А. Полякова, Ю. Б. Селецкого, С. Л. Саакова, В. Н. Сойфера, Э. П. Соколовского, В. И. Ферронского, А. В. Якубовского и ряда других исследователей.

Было показано, что в глубоких водах территории СССР относительное содержание дейтерия колеблется от −180 до +11 ‰, кислорода от −21,5 до +6,1 ‰ (табл. 37).

На основании данных по распределению дейтерия и кислорода вод и рассолов артезианских бассейнов большинство исследователей приходят к выводу о широком развитии в центральных, наиболее погруженных частях бассейнов морских вод, разбавленных в той или иной степени инфильтрационными [42]. Учитывая это, Р. П. Готтих отмечает, что воды осадочного чехла подразделяются на ряд гидрогеологических областей, соответствующих крупным тектоническим элементам, и не имеют между собой активной гидродинамической связи. Региональных перемещений водных масс в пределах таких бассейнов не наблюдается. В связи с

Таблица 37

Распределение D и ^{18}O в подземных водах территории СССР.
По В. И. Ферронскому и В. А. Полякову

Район исследования	Содержание, ‰	
	D	^{18}O
Прибалтийский	От —119 до —48	От —18,8 до —6,3
Припятский прогиб	От —95 до +2	От —12,7 до +1,0
Украинские Карпаты	От —108 до —7	От —13,1 до +3,0
Днепровско-Донецкий	От —55 до +11	От —7,2 до +0,3
Прикаспийская впадина	От —107 до —33	От —10,1 до —2,4
Предкавказье	От —67 до —15	От —12 до +5,8
Кавказские минеральные воды	От —118 до —42	От —12,7 до 1,1
Сочи-Адлерский	От —7,3 до —35	От —9,8 до —0,5
Ясханская линза пресных вод	От —89,2 до —54,4	От —12,4 до —2,5
Западно-Туркменский	От —79 до —4	От —13,4 до +4,4
Московский	От —158 до —81	—
Ферганский	От —106 до —78	От —10,9 до +1,7
Амударьинский	От —102 до —20	От —12,3 до +6,1
Сибирская платформа	От —180 до —2,3	От —21,5 до 0,0

этим их нельзя рассматривать в качестве артезианских бассейнов с зонами питания, длинными путями передвижения и областями разгрузки.

В последние годы в глубоких горизонтах седиментационных бассейнов обнаружено широкое развитие опресненных вод. Суждения о генезисе этих вод остаются пока дискуссионными. Некоторые исследователи считают, что в данном случае изотопная диагностика может существенно помочь, так как уже сейчас она позволяет различать воды современной и древней инфильтрации, дегидратационные воды глинистых минералов, конденсатогенные воды, приуроченные к залежам углеводородов, и флюиды ювенильного происхождения.

Наряду с глубокими подземными водами седиментационных бассейнов большое внимание исследователей привлекают гидротермы **горноскладчатых** и вулканических областей. Изучение изотопного состава гидротерм различных районов мира позволяет говорить об их тесной генетической связи с поверхностными водами, а чаще с метеорными. Участие же ювенильных вод в питании гидротерм незначительно, их доля, по Д. Уайту, не превышает 5—10 %. Такие суждения хорошо увязываются с интерпретацией данных по изотопам водорода воды, углерода углекислоты и аргона во флюидных включениях районов образования рудных месторождений, где установлено, что воды на преобладающем большинстве высокотемпературных месторождений (пегматитовых, редкометальных, скарновых, медномолибденовых) на ранних стадиях геологического развития имеют глубинное происхождение,

а на поздних — метеорное. В стратиформных месторождениях (гидротермально-осадочных) фиксируется морская вода, а на более поздних — метеорная, по Д. В. Аревадзе и В. З. Ярошевичу. Аргон в флюидных включениях отражает режим воды. На начальных стадиях формирования высокотемпературных месторождений он глубинный, а на завершающих отмечается возрастание доли воздушной составляющей.

Таким образом, кратко изложенные данные по изотопному составу воды позволяют сделать следующие выводы. В генетическом отношении в глубоких частях артезианских бассейнов распространены преимущественно седиментационные воды, в разной степени разбавленные инфильтрационными; местами обнаруживаются опресненные воды, вероятно, дегидратационного и конденсационного генезиса; в верхних частях — преобладают инфильтрационные воды. Гидротермы горноскладчатых областей характеризуются водами преимущественно инфильтрационного генезиса. Дальнейшее накопление материала по изотопному составу подземных растворов позволит более уверенно и надежно интерпретировать эмпирический материал и судить о генезисе минеральных, термальных и промышленных вод.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СИСТЕМАТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД

Учитывая отмеченные выше сложный многокомпонентный и изотопный состав, кислотно-основные и окислительно-восстановительные свойства и термодинамические параметры, разделение природных вод и рассолов по группам и типам часто производится по: минерализации; ионному составу; кислотно-щелочным и окислительно-восстановительным свойствам pH и Eh; температуре; газовому составу; радиоактивности; содержанию органических веществ. Эти показатели часто являются основными при отнесении природных вод к минеральным, термальным и промышленным.

Имеется несколько классификаций природных вод по степени минерализации. Так, например, по классификации В. И. Вернадского различают воды: пресные (до 1 г/л), очень слабо соленые (1—10 г/л), слабосоленые (10—35 г/л), соленые (35—50 г/л), рассолы (более 50 г/л).

Вслед за В. И. Вернадским, Ф. П. Саваренский, Г. Н. Каменский, В. А. Сулин, В. А. Приклонский и другие ученые называли рассолами природные растворы с содержанием солей более 50 г/л. Однако в начале 60-х годов граница рассолов подвергалась пересмотру. И. К. Зайцев, А. И. Дзенс-Литовский, М. Г. Валяшко и другие исследователи предложили называть рассолами природные растворы с минерализацией более 35 г/кг (36 г/л), обосновывая это верхней границей солености (средняя минерализация) океанической воды. В это же время появилось ряд классификаций собственно рассолов по степени минерализации (Г. Н. Каменский; И. К. Зайцев; М. Г. Валяшко; Е. В. Пиннекер). Из них

можно назвать классификацию Е. В. Пиннекера, И. К. Зайцева, Н. И. Толстихина, достаточно хорошо учитывающих растворимость солей (табл. 38).

Основной состав природных вод определяется главным образом содержанием следующих ионов: CO_3^{2-}, HCO_3^-, $SO^2_4^-$, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, $Na^+ + K^+$. Для наглядного изображения анализов состава минеральных вод М. Г. Курловым была предложена формула, названная его именем и широко используемая в гидрогеологической практике. По этой формуле легко классифицировать и систематизировать анализы химического состава природных вод.

В настоящее время известно несколько десятков классификаций подземных вод по ионному составу, которые условно можно разбить на две группы. К первой группе классификаций относятся те, в которых при отнесении к тому или иному типу вод принимаются во внимание соотношение и содержание основных ионов (от 5 до 33 %), но без учета растворимости их солевых форм. Ко второй — те, которые учитывают как соотношение ионов, так и растворимость их солевых форм. Первый подход, наиболее распространеный, прослеживается в классификации Л. С. Балашова [33], которая в последние годы используется рядом исследователей для изучения редкометальных промышленных вод (табл. 39). Второй — в классификациях Ч. Пальмера, Н. С. Курнакова, М. Г. Валяшко, Н. И. Толстихина, В. А. Сулина, О. А. Алекина (табл. 40).

При определении таксономнческих единиц Л. С. Балашовым учитывались максимально два аниона и два катиона и различие в составе на границе 95 %. На основе сочетаний элементов, а также степени их концентрацин в водном растворе выделены геохимические семейства, группы, типы, подтипы и классы природных вод. Некоторые классы хлоридных вод подразделены на подклассы. Классификация включает две группы, 55 типов и 354 класса природных вод.

Распространенность различных классов хлоридных вод неодинакова как в количественном отношении, так и в отношении природных условий их встречаемости. Большинство классов относится к пластовым водам осадочных отложений артезианских бассейнов; некоторые встречаются только среди термальных вод в районах современной вулканической деятельности. По Л. С. Балашову, отдельные классы вод встречаются и в пластовых осадочных толщах, и в вулканических районах, и среди микровключений минералов; установлены классы вод, имеющие преимущественное распространение среди вод соляных озер.

Из многочисленных классов чистых хлоридных вод ($Cl \geqslant 95$ %) только несколько вполне определенных классов обогащены редкими элементами и представляют собой потенциальное гидроминеральное сырье. К их числу относятся Cl—Ca—Na, -Cl—Na—Ca, -Cl—Mg—Ca, -Cl—Na—Mg, -Cl—Ca—Mg-е воды и рассолы (табл. 41).

Таблица 38

Схема подразделения природных вод по степени минерализации.
По И. К. Зайцеву и Н. И. Толстихину

Группа вод	Индекс	Наименование вод	Минерализация, г/кг	Разделение лечебных минеральных вод, по В. В. Иванову и Г. А. Невраеву	Минерализация, г/л
Пресные	$A_{0,01}$	Сверхпресные	<0,01	Неминеральные воды	<2
	$A_{0,1}$	Пресные	До 0,1		
	$A_{0,3}$	Особо пресные	0,1—0,3	Пресные и слабосолоноватые	
	$A_{0,5}$	Нормально пресные	0,3—0,5		
	A	Пресноватые	0,5—1,0		
Соленые	$Б_3$	Слабосолоноватые (очень слабосоленые)	1,0—3,0	Минеральные воды	>2
	$Б_{10}$	Среднесоленые (сильносолоноватые)	3,0—10,0	Малой минерализации	2—5
				Средней минерализации	5—15
				Высокой минерализации	15—35
	$Б_{35}$	Сильносоленые	10,0—35,0		
Рассолы	B_{70}	Весьма слабые рассолы	35—70	Некрепкие рассолы	35—150
	B_{140}	Слабые рассолы	70—140	Крепкие рассолы	>150
	B_{270}	Крепкие рассолы	14—270	То же	»
	B_{350}	Весьма крепкие рассолы	270—350	»	»
	B_{350}	Сверхкрепкие рассолы	Свыше 350	»	»

Применительно к разработанной классификации Л. С. Балашов приводит средние концентрации редких элементов в подземных водах и рассолах (см. табл. 39); этот материал даст представление об обогащенности редкими элементами выделенных классов вод, однако не отражает зависимости процессов обогащения подземных вод от степени концентрирования и стратиграфической их приуроченности. Следует отметить также некоторую условность в выделении классов и подклассов вод по содержанию в них катионов и трудности в практическом использовании классификации, возникающие вследствие многочисленности выделяемых классов и подклассов природных вод. Тем не менее, основы классификации Л. С. Балашова могут успешно использоваться при изучении закономерностей распространения различных типов подземных вод и изменения в них концентраций рассеянных элементов и редких металлов, в частности, при гидрогеохимическом картировании того или иного артезианского бассейна. Подробные рекомендации по использованию классификации приводятся в работе [33].

Подземные промышленные воды являются по степени минерализации преимущественно рассолами. В связи с этим для анализа закономерностей распространения и накопления редких элементов использованы основы учения о физико-химических свойствах рассолов, учитывающие прежде всего растворимость солей. К числу наиболее важных работ этого направления относятся исследования Н. С. Курнакова и его последователей по созданию основ физико-химического анализа поведения хлоридных, сульфатных и карбонатных систем. С учетом такого анализа построены классификации второй группы, и прежде всего классификация М. Г. Валяшко [5], в которой учтены процессы, протекающие в самих природных водах и приводящие к отбору наиболее устойчивых ассоциаций ионов в растворах. В природных условиях земной коры (во всяком случае, ее верхних структурных этажей) возможно формирование одной из трех следующих ассоциаций.

1. Содовая (карбонатная); определяющая система Na^+, (K^+), CO_3^{2-}, HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, H_2O (кальций и магний в пределах растворимости их карбонатов).

2. Сульфатная; определяющая система Na^+, (K^+), Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^-, H_2O (кальций в пределах растворимости сульфатов и карбонатов, карбонаты в пределах растворимости кальциевых и магниевых солей).

3. Хлоридный или хлоркальциевый; определяющая система Na^+, (K^+), Mg^{2+}, Ca^{2+}, Cl^-, H_2O (сульфаты и карбонаты в пределах растворимости их кальциевых солей).

Перечисленным ассоциациям отвечают естественные химические типы природных вод того же наименования. Каждый тип вод может быть охарактеризован известными физико-химическими системами, определяющими свойства природных вод данного типа во всем диапазоне их концентраций. Использование этой классификации приводит к новым и весьма интересным результатам при гидрохимическом изучении промышленных рассолов.

Средние характеристики и средние значения концентраций редких элементов вод артезианских бассейнов.

Класс	Номер класса	Подкласс	Степень распространенности вод
Cl—Ca—Na	1	а	Широко распространенные
Cl—Ca—Na	1	б	Очень широко распространенные
Cl—Mg—Na	3	а	Распространенные
Cl—Mg—Na	3	б	То же
Cl—Na	4	а	»
Cl—Na	4	б	»
Cl—Na—Ca	5	—	»
Cl—Mg—Ca	7	—	Мало распространенные
Cl—Na—Mg	9	—	То же
Cl—Ca—Mg	11	—	»
Cl—Mg	12	—	Редко распространенные
HCO_3—Cl—Na	—	—	Распространенные
SO_4—Cl—Ca—Na	—	—	То же

Таблица 39

(мг/л) в различных геохимических классах и подклассах подземных хлоридных
По Л. С. Балашову

М, г/л	H, м	T °С	pH	Li	Rb	Cs	Sr	B	I	Br	$\frac{r\,Na}{r\,Cl}$
32,6	1553	54	7,13	5,4	0,78	0,35	122	48	30,2	87	0,83
185	1608	40	6,27	12,4	1,5	0,39	440	31	14,2	575	0,73
30,6	109,2	37	7,48	1,5	0,19	0,19	35	41	27,2	65	0,87
19,2	817	16	6,67	1,94	0,64	0,18	86	18	11,6	632	0,88
32,7	2043	65	7,45	2,1	0,79	0,35	51	62	27,3	86	1,0
253	980	14	6,64	1,48	0,38	0,22	45	15	1,8	70	0,99
353	2330	53	5,33	92	15,8	1,87	2410	45	22,6	3887	0,31
444	2285	53	4,76	141	13,8	0,78	4110	176	13,3	5370	0,08
346	700	17	5,35	88	11,4	1,65	82	540	13,6	3910	0,26
380	1620	45	4,79	94	16,7	—	450	1014	36,8	2180	0,14
406	849	21	4,42	148	10,2	—	75	630	18,2	7290	0,04
16,2	1321	52	7,65	2,8	0,21	0,14	11	57	26,2	46	1,21
26	530	24	7,35	1,5	0,14	0,19	24	31	4,2	37	1,04

Таблица 40

Сопоставление классов и типов вод по разным классификациям

Класс. по Ч. Пальмеру (1911 г.)	Тип				
	по М. Г. Валяшко (1935 г.)	по В. А. Сулину (1946 г.)	по О. А. Алекину (1946 г.)	по Н. И. Толстихину (1935 г.)	
Первый	Карбонатный	Гидрокарбонатно-натриевый	Первый	Байкальский	Содовый
	Подтип Na_2SO_4	Сульфатно-натриевый	Второй	Оз. Шира	Мирабилитовый
Третий	Сульфатный Подтип $MgCl_2$	Хлормагниевый	Третий «а»	Океанический — морской	С наличием хлористого магния
Четвертый	Хлоридный	Хлоркальциевый	Третий «б»	Усольский	С наличием хлористого кальция
Пятый	Аналогов нет	Аналогов нет	Четвертый	Улан-Булакский	Железистый, кислый

Кроме этих классификаций ниже рассмотрены классификации минеральных и термальных вод, отражающие разделение вод по наличию биологически активных компонентов, pH и температуре. Как известно, к минеральным питьевым водам относят природные водные растворы, оказывающие на организм человека лечебное воздействие, обусловленное либо повышенным содержанием полезных биологических активных компонентов их ионного или газового состава, либо общим ионно-солевым составом и физическими свойствами. К таким растворам относят воды с общей минерализацией не менее 1 г/л (реже — при меньшей минерализации), содержащие биологически активные компоненты в количестве не ниже бальнеологических норм, принятых в СССР для питьевых минеральных вод (см. гл. 2).

К минеральным питьевым лечебно-столовым водам относят водные растворы с общей минерализацией от 1 до 10 г/л; к минеральным питьевым лечебным — от 10 до 15 г/л или с минерализацией менее 10 г/л при наличии в них повышенных количеств мышьяка, бора и некоторых других биологически активных микроэлементов.

По величине pH подземные минеральные воды подразделяются на семь групп: сильнокислые $pH<2$; кислые $2<pH<4$; слабокислые $4<pH<6{,}5$; условно нейтральные $6{,}5<pH<7{,}5$; слабощелочные $7{,}5<pH<8{,}3$; щелочные $8{,}3<pH<9$; сильнощелочные $pH>9$.

В зависимости от химического состава и физических свойств природные минеральные воды, предназначенные для бальнеотера-

Таблица 41

Геохимическая классификация природных вод чистого хлоридного типа (критерий типа Cl>95 %)

Подтип	Класс	Критерий класса	Распространенность (встречаемость) класса*
Хлоридно-натриевый	Cl—Ca—Na	Na>Ca>других катионов	п, в, ж, о
	Cl—K—Na	Na>K>других катионов	п, в, ж
	Cl—Mg—Na	Na>Mg>других катионов	п. о
	Cl—Na	Na>95 %	п, в, о
Хлоридно-кальциевый	Cl—Na—Ca	Ca>Na>других катионов	п, ж, к
	Cl—K—Ca	Ca>K>других катионов	ж
	Cl—Mg—Ca	Ca>Mg>других катионов	п
	Cl—Ca	Ca>85 %	п, ж, к
Хлоридно-магниевый	Cl—Na—Mg	Mg>Na>других катионов	п, о
	Cl—K—Mg	Mg>K>других катионов	п
	Cl—Ca—Mg	Mg>Ca>других катионов	п
	Cl—Mg	Mg>85 %	п
Хлоридно-железный	Cl—Fe	Fe>95 %	в
Хлоридно-водородный	Cl—H	H>95 %	в

* п — распространены среди пластовых и поровых вод осадочных отложений; в — встречаются среди горячих вод современных вулканических районов; ж — встречаются среди жидких микровключений гидротермальных и магматических минералов; к — обнаружены среди конденсатов вулканических паров; о — встречаются в озерных водах.

певтического использования, подразделяются на следующие основные группы вод: А — углекислые, Б — сероводородные, В — радоновые, Г — кремнистые термы, Д — бромные, йодно-бромные и йодные, Е — минеральные, лечебное действие которых определяется основным ионно-солевым составом.

При использовании термальных вод для теплотехнических и энергетических целей выделяют воды: низкопотенциальные (с температурой 35—70 °С), среднепотенциальные (70—100 °С), высокопотенциальные (более 100 °С).

Учитывая возможность практического использования высокопотенциальных вод, а также сложность бурения поисковых и разведочных скважин, специфику протекания тепломассообменных процессов в водонасыщенных породах и стволах скважин, фазовое

состояние добываемого теплоносителя, целесообразо выделять слабоперегретые воды (с температурой 100—150 °С), перегретые (150–250 °С), высокоперегретые (250—350 °С) и предельно перегретые (более 350 °С).

По В. В. Иванову и Г. А. Невраеву, при использовании термальных вод для лечебных целей их следует подразделять на теплые (слаботермальные) — 20—35 °С, горячие (термальные) — 35—42 °С и очень горячие (высокотермальные) — с температурой более 42 °С.

При изучении промышленных, минеральных и термальных вод основное внимание уделяется гидротермам вулканических и горноскладчатых областей и подземным водам и рассолам артезианских бассейнов. Общие закономерности изменения химического состава этих вод рассмотрены в предыдущих главах. Однако для решения условий формирования химического состава данных растворов требуется анализ их как физико-химических систем в статическом, динамическом и ретроспективном аспектах. Ниже рассмотрены подземные рассолы, представляющие основной объем подземных вод стратисферы.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Формирование подземных вод под влиянием естественных факторов рассматривается в гидрогеологии обычно применительно к настоящему и прошедшему времени. Изучение поведения подземных вод в физически измеряемом времени (настоящем) осуществляется методами гидродинамики, механики, физики, химии и других областей знаний, прилагаемых к исследованию природного объекта. Это является задачей динамической гидрогеологии, исследующей факторы и процессы движения и формирования подземных вод в период, доступный проведению соответствующих наблюдений. Рассмотрение условий формирования подземных вод в ретроспективе, реконструкция воздействия факторов и процессов на подземные воды в течение геологического времени их существования, — предметы исследований исторической гидрогеологии, или палеогидрогеологии.

Говоря о проблеме формирования подземных вод, мы прежде всего имеем в виду вторую задачу — восстановление геологической истории формирования подземных вод. Очевидно, что без знания современных факторов и процессов, определяющих формирование ресурсов и состава подземных вод, палеогидрогеологические построения этого направления невозможны или неэффективны. Подобные построения будут некорректны в случае приложения знаний о гидрогеологических процессах и факторах к недостаточно точно изученной исходной природной среде. Исходный состав подземных вод определяется их генезисом. Таким образом, воссоздавая историю формирования подземных вод в том или ином гидрогеологическом районе, необходимо учитывать исходный со-

став природных вод, т. е. их генетические особенности, и их преобразование в подземной обстановке в геологическом времени.

Как известно, в настоящее время отсутствует единый взгляд на условия формирования подземных вод глубоких горизонтов артезианских бассейнов. Имеется ряд касающихся этого вопроса гипотез, в основу каждой из которых поставлены тот или иной источник вод и насыщающих их солей (ювенильная, седиментационная, инфильтрационная, дегидратационная), или факторы и процессы, приводящие к перераспределению и накоплению составляющих подземные воды компонентов (гравитационная, трансляционная, диффузионная, осмотическая и др.).

Очевидно, нет необходимости доказывать, что гипотезами учитываются реальные источники, факторы и процессы. Однако в большинстве случаев каждая из концепций абсолютизируется исследователем, тогда как роль отдельных факторов формирования подземных вод не может быть признана однозначной для всего многообразия гидрогеологических условий. Подземные воды, если понимать под ними геологическое тело, каковым они и являются, могут быть изучены как статическая, динамическая и ретроспективная системы, которые будут отличаться характером связей элементов этих систем, принципами и методами исследований. При этом следует иметь в виду, что подземные воды, рассолы и образуемые ими системы находятся под воздействием механических, физических, химических, биологических и антропогенных факторов. Поэтому изучение условий формирования подземных вод и определяющих эти условия наиболее важных факторов и процессов для конкретных гидрогеологических районов требует комплексных системных исследований.

Проблема исследования генезиса подземных вод и рассолов является одной из главных задач теоретической гидрогеологии. В настоящее время эта проблема не решается однозначно, и пока не существует обоснованной единой теории, логично объясняющей для всех случаев происхождение и формирование подземных вод и рассолов. Современные представления в этой области знаний сводятся к ряду гипотез и предположений, которые объединяются преимущественно в три направления: 1) эндогенное (ювенильное), 2) инфильтрационное, 3) седиментационное. Возникновение основ эндогенной, инфильтрационной и седиментационной гипотез происхождения подземных вод уходит корнями в глубокую древность. Однако как научные гипотезы они начали формироваться лишь на рубеже XX столетия. В их развитие вкладывали и продолжают вкладывать свой труд многие советские и зарубежные гидрогеологи.

Эндогенная, или ювенильная гипотеза происхождения подземных вод и рассолов была выдвинута Э. Зюссом и развивалась в трудах Н. Д. Буданова, И. Г. Баранова, В. Ф. Дерпгольца, К. П. Калицкого, Д. Ф. Кемпа, А. Н. Козина, Н. А. Кудрявцева, А. Ф. Лебедева, К. В. Харичкова и других исследователей. Согласно этой гипотезе накопление основных компонентов минера-

лизации подземных вод, и в частности хлора, связано с их проникновением из мантии через толщу земной коры. Факт широкого распространения в толще осадочных отложений платформ, трещиноватой зоне кристаллических щитов и пород фундамента хлоридных минерализованных вод и рассолов дал основание В. Ф. Дерпгольцу говорить о гидрохлоросфере как пространственной геохимической оболочке, являющейся первоисточником основной массы земной гидросферы. Для подтверждения этой точки зрения в последнее время используются результаты изучения подземных вод областей современного вулканизма.

Сторонники ювенильной гипотезы (И. Г. Баранов, Н. А. Кудрявцев, В. И. Созанский и др.) считают, что погребенные соли также характеризуются эндогенным происхождением, чем и объясняют видимый парагенезис солей и рассолов в соленосных артезианских бассейнах. В последнее время И. Н. Струна развивает гипотезу «метасоматического» происхождения хлоридных кальциевых вод.

Суть ее заключается в предположении, что образование минерализованных вод и рассолов происходит в результате воздействия компонентов газовой фазы магматических процессов на карбонатный материал осадочных отложений.

Инфильтрационная гипотеза формирования подземных минерализованых вод и рассолов имеет несколько разновидностей, однако общей идеей в них является то, что основные запасы глубоких вод образуются за счет инфильтрационного питания. Химический состав этих вод (современных и древних) формируется в результате воздействия различных физико-химических процессов, в том числе процессов взаимодействия вод и пород.

Идеи инфильтрационного происхождения подземных минерализованных вод в той или иной модификации используются для объяснения устанавливаемых на основе обработки фактического материала гидрогеохимических закономерностей. Так, В. А. Сулин, М. А. Гатальский, Г. М. Сухарев и В. Н. Корценштейн считают, что минерализация и химический состав подземных вод формируются при взаимодействии инфильтрационных вод с морским солевым комплексом осадочных отложений. Е. В. Пиннекер объясняет наличие и химический состав рассолов соленосных бассейнов процессами выщелачивания соленосных формаций инфильтрационными водами и последующим преобразованием получающихся растворов за счет катионного обмена с вмещающими породами. По его мнению, например, инфильтрационный водообмен в пределах Ангаро-Ленского бассейна мог осуществляться более 10 раз. Формирование подземных минерализованных вод и рассолов за счет диффузионного оттока солей объясняют В. В. Красинцева и С. И. Смирнов. Последний полагает, в частности, что темпы диффузионного массопереноса таковы, что даже в глинистых (т. е. весьма слабо проницаемых) породах погребенные седиментационные воды и рассолы, вероятно, сохраняются только в отложениях, по возрасту не древнее палеогена.

Седиментационная гипотеза исходит из предположения, что подземные воды попадают в горные породы в процессе осадконакопления. Формирование этих представлений в качестве научной гипотезы связано с именами С. Хента и А. А. Потылицына, которые использовали подобные представления для объяснения наличия рассолов в глубоких горизонтах земной коры. В результате исследований Н. И. Андрусова, В. И. Вернадского, Д. В. Голубятникова и многих геологов-нефтяников эти представления были оформлены в достаточно стройное учение. В. И. Вернадский писал, что океан — в своих морях и прибрежных частях — сам является первоисточником стратисферы. Однако для объяснения процессов формирования химического состава подземных вод и рассолов необходимы были знания о составе вод древнего океана.

Мнения исследователей по этому вопросу разделились. Одна группа авторов использовала положение о постоянстве состава океанических вод в течение геологической истории земли; к этой группе исследователей относятся: Н. И. Андрусов, А. Д. Архангельский, М. Г. Валяшко, А. П. Виноградов, А. Е. Ходьков и др. Они считают, что захоронялись древние рассолы или воды нормальной морской солености, аналогичные по составу водам современного океана и морских бассейнов, но в последующем преобразовавшиеся в подземной обстановке.

Другая группа исследователей, придерживаясь седиментационной гипотезы, считает, что состав вод океана претерпевал изменения, и делает попытку восстановить историю формирования состава подземной гидросферы с учетом возможной эволюции состава океанических вод в фанерозое. Эта точка зрения развивается в трудах А. Н. Бунеева, И. Г. Грамберг, С. А. Дурова, Ю. Ф. Кореннова, А. С. Лейна, Е. В. Посохова, В. М. Попова, Н. С. Спиро. Причем Ю. Ф. Кореннов и Е. В. Посохов считают, что в течение палеозоя состав вод океана являлся **хлоридным, и** содержание в них магния было больше содержания кальция; В. М. Попов находит, что при хлоридном составе океанических вод содержание в них кальция превышало содержание магния. Названные гипотезы касаются генетических вопросов происхождения подземных вод. Кроме того, выдвинут ряд гипотез о возможном преобразовании подземных вод и рассолов в подземной обстановке. Кратко остановимся на рассмотрении некоторых из них.

Подземное концентрирование растворов, по-видимому, возможно несколькими путями, однако в гидрогеохимии нет пока единого мнения о ведущем значении какого-либо из них. Среди таких процессов называются подземное испарение, осмос, фильтрационный эффект, гравитационная дифференциация ионов и ряд других процессов.

Известно, что испарение является главным процессом формирования минерализации и химического состава поверхностных и грунтовых вод в аридных климатических условиях. В начале XX в. К. Миллс и Ф. Уэльс предположили, что этот же процесс

обусловливает высокую соленость рассолов нефтяных месторождений. Согласно этой гипотезе концентрация солей в подземных водах повышается в основном под воздействием расширения и выделения заключенного в ней газа. К числу факторов, определяющих испарение на глубине, относятся: повышение температуры, появление и движение газа и степень насыщения подземной атмосферы водяными парами. Увеличение минерализации подземных вод сопровождается выпадением солей.

На возможность подземного испарения указывал В. И. Вернадский. Эта гипотеза получила развитие в трудах А. Ф. Лебедева, В. А. Сулина, М. Е. Альтовского, И. К. Илларионова. Этим процессом М. Е. Альтовский объяснял происхождение ископаемых солей, он представлял механизм действия подземного испарения следующим образом: рассеянные в подземной воде мельчайшие пузырьки газа являются газовой фазой, внутри которой происходит подземное испарение всех подземных вод, в том числе и глубоких напорных. Бо́льшая часть смеси газов и водных паров рассеивается в земной коре и улетучивается в атмосферу путем вертикальной диффузии и выделения спонтанных газов, поднимающихся по слоям или по глубоким тектоническим трещинам.

Процессом подземного испарения, связанного с нефтяными и газовыми залежами, в настоящее время объясняют появление опресненных вод, которые вскрыты практически во всех нефтегазоносных бассейнах. На эти воды впервые обратил внимание Б. И. Султанов. В. В. Колодий считает, что образование конденсационных вод — непременное следствие изменения температуры и давления мигрирующей углеводородной смеси. Чем выше температурный градиент на пути миграции, чем короче этот путь и чем больше объем мигрировавших углеводородов, тем больше образуется маломинерализованных вод.

Наличие в земной коре градиента температур позволило Н. Н. Палей объяснить концентрирование за счет диффузии молекул воды через глинистые толщи и повышение минерализации исходного раствора. Обосновывалась эта идея следующим образом: вода поглощается глинистой мембраной с той стороны, где выше упругость паров, и отделяется там, где упругость паров ниже. Упругость пара чистой воды при 10 °С равна $1{,}2 \cdot 10^3$ Па, а крепкого рассола, содержащего 300 г/кг NaCl при 60 °С (глубина 1500 м), — $2{,}5 \cdot 10^4$ Па. Поэтому Н. Н. Палей предполагал, что диффузия воды в геотермическом поле может приводить даже к перенасыщению подземных рассолов и выпадению из них солей в коллекторах.

Д. С. Коржинский считает, что раздельное перемещение растворителя и растворенного вещества, особенно через тонкие фильтры (глины), может приводить к существенному концентрированию растворов. Эта точка зрения получила название «фильтрационный эффект Д. С. Коржинского». Соленость вод нефтяных месторождений объясняет «фильтрационным эффектом» американский геолог Л. Де Ситтер.

К. Ф. Филатов считает, что концентрирование подземных вод возможно за счет гравитационной дифференциации растворенных в подземных водах солей в условиях платформенных депрессий. Идея гравитационной дифференциации состоит в том, что под влиянием сил тяготения происходит расслоение земного вещества по плотности. Эта идея в общем виде была высказана еще Ч. Дарвиным и Ф. Ю. Левинсон-Лессингом. К. Ф. Филатов же предположил, что ионы, обладающие большей плотностью, перемещаются в глубину быстрее по сравнению с ионами меньшей плотности, что приводит к накоплению в глубине хлора, натрия, кальция, магния и брома, в более верхних зонах — сульфатов, а еще выше — гидрокарбонатов.

Расчетным путем им получены ионные плотности анионов и катионов

$$HCO_3^- < SO_4^{2-} < Cl^- < Br^- < I^-,$$

$$K^+ < Na^+ < Ca^{2+} < Mg^{2+} < Fe^{2+} < Si^{3+}.$$

О. Я. Самойлов и Д. С. Соколов, привлекая идеи физической химии и, в частности, особенности теплового движения молекул воды и ионов в растворах, приводят практически аналогичный порядок дополнительных скоростей движения вниз ионов. Для катионов они приводят такой ряд: $Mg^{2+} < Ca^{2+} < Na^+ < Sr^{2+} < Ba^{2+} < K^+$.

В последние годы весьма интересные данные, важные для понимания генетических особенностей глубоких подземных вод, получены путем сравнительного гидрогеохимического анализа, анализа состава водных включений в солях, а также в результате изучения изотопного состава подземных вод и рассолов различной минерализации и состава. Так, анализ гидрогеохимических закономерностей подтверждает, что во многих гидрогеологических районах при переходе от нижних более древних горизонтов к верхним отмечается уменьшение содержания в рассолах хлоридов кальция, калия, брома, стронция, рубидия и лития. Состав седиментационных рассолов одновозрастных водоносных комплексов претерпевает однотипные закономерности изменения, что может свидетельствовать о едином источнике формирования рассолов одновозрастных водоносных комплексов. Химический состав под-, меж- и внутрисолевых рассолов обычно однотипен, парагенетически соответствует составу вмещающих солей и также подчиняется определенным закономерностям. Данные радиохимических и изотопных исследований подземных рассолов различных бассейнов мира свидетельствуют о том, что в большинстве случаев они представляют собой захороненные морские воды, в той или иной мере разбавленные инфильтрационными.

Определение генетических особенностей подземных вод глубоких горизонтов часто затрудняется в связи с воздействием в течение геологической истории развития артезианских бассейнов разнообразных процессов и факторов, существенно видоизменяющих первоначальный облик подземных вод. В связи с этим задачей

гидрогеологических исследований этого направления является выявление таких факторов и процессов и оценка их роли в формировании химического состава подземных вод и рассолов. Этим вопросам посвящена обширная региональная и специальная гидрогеологическая литература. В данной работе, учитывая ее направленность, целесообразно остановиться на тех процессах, которые в основном определяют состав подземных рассолов, обогащенных рассеянными элементами и редкими металлами.

Результаты изучения процессов формирования состава природных вод

Природные растворы как сложные физико-химические системы в подземной обстановке подвергаются воздействию механических, физических, химических и биологических сил, которые в течение времени сохраняют или изменяют состояние этой системы. Изучение процессов формирования этих систем и построение динамических моделей проводится с помощью как натурных, так и лабораторных экспериментов. В гидрогеохимии, например, изучаются и описываются воздействия факторов и процессов на формирование химического состава подземных вод. Ниже приведены факторы, по Е. В. Посохову с дополнениями Е. В. Пиннекера, и процессы, по Е. В. Пиннекеру, формирования состава подземных вод [36—37].

Группа факторов	*Отдельные факторы*
Физико-географические	Рельеф, климат, гидрология, выветривание и цементация
Геологические	Геологическая структура, тектонические движения, вещественный состав пород, магматизм, газовый фактор
Физико-химические	Химические свойства элементов, растворимость химических соединений, pH и Eh — условия
Физические	Температура, давление, время, пространство
Биологические	Объединяют влияние живого вещества (микроорганизмов, растений, животных)
Антропогенные (искусственные)	Обусловлены производственной деятельностью человека (нарушением естественного режима, загрязнением и т. д.)

Группа процессов	*Основные процессы*
Перенос растворенного вещества	Молекулярная диффузия, фильтрация, диффузионно-конвективный массоперенос
Воспроизводство растворенного вещества	Гидролиз, выщелачивание и растворение
Поглощение растворенного вещества	Кристаллизация (выпадение солей), сорбция
Сочетание ввода вещества в раствор и вывода его из раствора	Ионный обмен, окислительно-восстановительные и биогеохимические реакции, радиоактивный распад

Добавление или удаление молекул растворителей (воды)	Гидратация минералов, дегидратация минералов, подземное испарение, подземное вымораживание, мембранный эффект

Следует учесть, что изучение физико-химических систем в геологии немыслимо без знания физики и химии и, в частности, термодинамики, широко применяющейся в геохимии, петрологии и минералогии. Исходя из этого часть материала данного раздела изложена с учетом понятий термодинамики.

Термодинамические системы делятся на простые (химически однородные) и сложные (химически неоднородные), гомогенные (физические однородные) и гетерогенные (физически неоднородные), изолированные (замкнутые) и неизолированные (открытые, незамкнутые), адиабатно изолированные и адиабатно неизолированные. Системе противопоставляется внешняя среда — вещества, окружающие систему. В качестве основных параметров системы обычно выбираются такие ее свойства, которые сравнительно просто могут быть измерены опытным путем. Это прежде всего удельный объем, температура, давление и состав. Остальные свойства системы выражаются как функции основных ее параметров. Состояние системы может быть равновесным и неравновесным.

Переход системы из одного состояния в другое называется процессом. При каждом процессе одни параметры системы изменяются, другие остаются неизменными. В зависимости от того, какие параметры системы при переходе ее из одного состояния в другое остаются постоянными, процессы делятся на изохорические (V=const), изобарические (P=const), изотермические (T=const), изохорно-изотермические (V, T=const), изобарно-изотермические (P, T=const). Различные агрегатные состояния вещества системы принято называть фазами: газообразная, жидкая и твердая.

Система, основными компонентами которой являются Na^+, (K^+), Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-}, H_2O, является гомогенной. Поскольку графическое отображение поведения этой системы весьма неудобно для пользования, О. Д. Кашкаров ввел ряд упрощений, причем в зависимости от соотношения между компонентами выделил три варианта:

$$1)\ CO_3^{2-} + 2HCO_3^- > Ca^{2+} + Mg^{2+};$$

$$2)\ Ca^{2+} + Mg^{2+} > CO_3^{2-} + 2HCO_3^-,$$

$$SO_4^{2-} > Ca^{2+} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^-;$$

$$3)\ Ca^{2+} > SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + 2HCO_3^-.$$

В первом случае, пренебрегая малорастворимыми солями $MgCO_3$, $CaCO_3$, $Mg(HCO_3)_2$, $Ca(HCO_3)_2$, которые выпадают в осадок на первых стадиях потери растворителя, О. Д. Кашкаров перешел к системе: $Na^+(Cl^-, SO_4^{2-}, CO_3^{2-})$, H_2O. Во втором случае, учитывая малорастворимость солей $CaSO_4$, $CaCO_3$, $MgCO_3$, $Mg(HCO_3)_2$, $Ca(HCO_3)_2$, рассмотрел систему (Na^+, Mg^{2+}), (Cl^-, SO_4^{2-}), H_2O. В третьем случае, отбрасывая малорастворимые соли

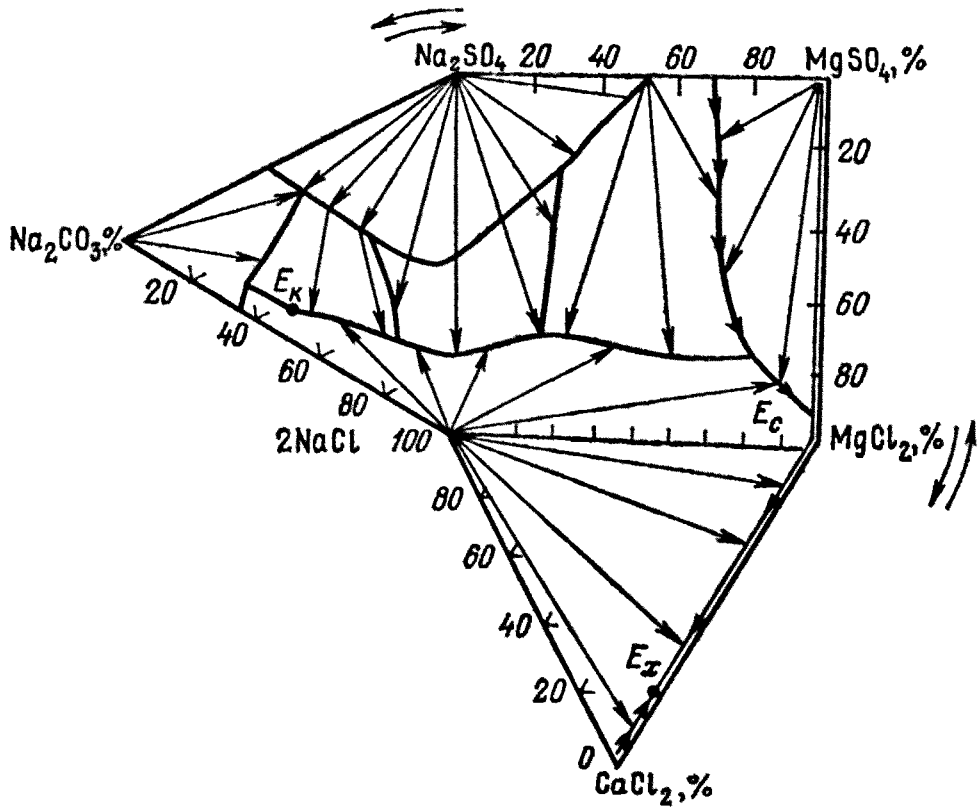


Рис. 13. Объединенная диаграмма трех основных химических систем вод. *По О. Д. Кашкарову*

$CaCO_3$, $MgCO_3$, $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$ и $CaSO_4$, систему свел к следующим компонентам: (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{2+}) Cl^-, H_2O.

Рассматривая равновесия этих систем в области насыщенных растворов при постоянных температурах, О. Д. Кашкаров отобразил их на плоскости: первую и третью треугольниками Розебума, вторую — квадратом Иенеке [23]. Графическое одновременное отображение этих систем на плоскости известно как диаграмма О. Д. Кашкарова (рис. 13). По классификационной схеме Н. С. Курнакова — М. Г. Валяшко рассмотренные варианты соответствуют карбонатному, сульфатному и хлоридному типам вод.

Известно, что растворимость химических соединений того или иного химического элемента является одним из основных факторов, определяющих его роль в формировании химического состава природных вод. При сравнении растворимости солей натрия, кальция и магния видно, что наибольшей растворимостью обладают хлоридные соли кальция и магния, а наименьшей — карбонаты кальция и магния; причем разность в абсолютных величинах растворимости различных солей достигает нескольких порядков:

Соли . . .	NaCl	$MgCl_2$	$CaCl_2$	$NaSO_4$	$MgSO_4$	$CaSO_4$	Na_2CO_3	$CaCO_3$	$MgCO_3$
Растворимость, г/л	358,6	558,1	731,9	168,3	354,4	2,01	192,9	0,013	0,022

Рассмотрению методики и результатов физико-химических исследований концентрирования сульфатного типа вод, к которому относятся воды современного океана, посвящен ряд специальных работ, из которых следует отметить работы Н. С. Курнакова и его сотрудников. С большой полнотой эти вопросы рассмотрены в работах М. Г. Валяшко.

Изменение состава морской воды в процессе концентрирования сводится к постоянному увеличению общей минерализации раствора и хлоридов магния. Концентрации калия и натрия вначале возрастают до определенного предела, а потом убывают (табл. 42).

Каждой стадии концентрирования сульфатного типа вод соответствует определенная степень концентрирования микроэлементов. Так, например, было проведено экспериментальное изучение поведения Br, B, Li, Rb, Sr, I в процессе испарения воды Черного моря (табл. 43). Из этих данных видно, что глубокое испарение морской воды приводит к формированию высокоминерализованных рассолов, обогащенных литием, йодом, бором и бромом. Рубидий накапливается в морских рассолах до стадии садки карналлита (311—318 г/кг). В эвтонических растворах он отсутствует. Стронций накапливается в морских рассолах до стадии садки галита, незначительно выделяясь в твердую фазу на стадиях садки карбонатов и гипса. Особенности поведения микроэлементов в процессе испарения морской воды, которая по составу относится к сульфатной системе, обусловлены: а) образованием труднорастворимых соединений и выделением их в твердую фазу на определенных стадиях сгущения (Sr, B); б) образованием хорошо растворимых соединений и накоплением их в жидкой фазе (Li, I); в) образованием изоморфных примесей с основным минералом (Br с хлоридами, Rb с калийными солями).

Экспериментальные данные по концентрированию хлоридной системы были получены Я. Г. Вант-Гоффом, Н. С. Курнаковым, А. В. Николаевым, М. Г. Валяшко, Н. П. Лужной, И. П. Верещетиной, Е. Ф. Соловьевой и другими исследователями. Учитывая важность знаний о поведении хлоридной системы при концентрировании, обратимся к изотермической диаграмме ее испарения (рис. 14). На диаграмме показано поведение четвертой системы ($CaCl_2+MgCl_2+NaCl+H_2O$) при ее концентрировании. Большую часть диаграммы занимает поле выпадающего галита. После выпадения его основной массы в зоне $Ca>Mg$ осаждаются $CaCl_2\cdot H_2O$; $CaCl_2\cdot 2MgCl_2\cdot 12H_2O$ и $MgCl_2\cdot 6H_2O$. В зоне $Mg>Ca$ выделяется $MgCl_2\cdot 6H_2O$. Однако, как известно, в природных хлоридных системах присутствует еще калий, поэтому необходимы знания о поведении системы $KCl+MgCl_2+CaCl_2+H_2O$. Эти данные приведены в табл. 44.

По диаграмме испарения четвертой системы можно легко рассчитать изменения катионного состава при потере системой молекул воды. В этом случае достаточно знать лишь отношения кальция к магнию. Так, при содержании кальция больше магния изменение катионного состава происходит по следующей схеме:

Таблица 42

Состав океанической воды различной степени сгущения. По М. Г. Валяшко

Стадии концентрирования	Массовое содержание солей (в %) на 100 г воды								Твердая фаза
	$CaCO_3$	$CaSO_4$	$MgSO_4$	$MgCl_2$	NaCl	KCl	NaBr	Σ	
Нормальная океаническая вода	0,134	1,276	2,305	3,385	27,667	0,763	0,09	35,62	—
Начало садки гипса	0,34	4,90	9,50	14,9	99,1	2,4	0,26	131,4	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
То же, галита	0,52	0,46	21	33,4	214,1	5,2	0,59	275,27	$CaSO_4 \cdot 2H_2O + NaCl$
» эпсомита	2,24	Следы	9,2	158,2	50,2	22,9	2,72	325,76	$CaSO_4 \cdot 2H_2O + NaCl + MgSO_4 \cdot 7H_2O$
» сильвинита	Не опр.	»	75,5	169,1	33,8	49,2	Не опр.	327,6	$NaCl + MgSO_4 \cdot 7H_2O + KCl$
» карналлита	3,01	»	64,4	218,4	24,2	31,6	3,9	345,5	$NaCl + MgSO_4 \cdot 6H_2O + KCl \times MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Эвтоника	4,57	»	39,9	308,6	10,5	1,9	5,99	371,46	$NaCl + MgSO_4 \cdot 6H_2O + KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O + MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Таблица 43

Роль испарения морской воды в накоплении ценных элементов.
По И. К. Жеребцовой

Стадии сгущения	Общая минерализация, г/кг	Содержание, мг/кг						
		Cl	Br	I	Li	B	Sr	Rb
Исходная морская вода	18,7	10,2	0,035	0,1	0,1	2,5	3,7	0,06
Садка карбонатов	78,5	41	0,15	—	—	—	14,0	—
Начало садки гипса	170,0	95,3	0,35	1,0	1,0	22,0	31,0	0,5
Конец садки гипса	270	149	0,55	—	—	—	—	—
Садка галита	270	149,5	0,82	1,3	5,9	65,0	20,5	1,3
Садка сульфата магния	311	158,0	2,3	3,7	6,6	168,0	6,3	4,3
Начало осадки калийных солей	318	173	3,7	4,1	—	266	Не обн.	7,3
Садка калийных солей	335	193	4,6	—	14,7	412	»	5,3
Садка бишофита	370	248,0	6,2	7	26,0	700	»	Не обн.

Примечание. Содержания Cl и Br даны в г/кг.

Na>Ca>Mg→Ca>Na>Mg→Ca>Mg>Na. При соотношении Na>Ca>Mg происходит постепенное возрастание содержания всех компонентов до момента садки галита, которое наблюдается обычно при концентрации хлора, равной 186—196 г/л. При этом же соотношении в дальнейшем отмечается относительно пропорциональное уменьшение содержания натрия и увеличение содержания кальция и магния. На этом отрезке происходит изменение в соотношении катионов Ca>Na>Mg. При содержании кальция меньше магния изменение катионного состава идет по схеме: Na>Mg>Ca→Mg>Na>Ca→Mg>Ca>Na→Ca>Mg>Na.

Следует отметить, что указанные изменения катионного состава до выпадения магниевых солей происходят при постоянном отношении кальция к магнию. Поэтому отношение кальция к магнию (Ca/Mg) является одной из важных характеристик хлоридной системы.

Указанный процесс четко фиксируется графически (рис. 15, 16). До начала выпадения галита на графике отмечается прямая пропорциональная зависимость между Cl, Na, Mg и Ca, затем — линейная. Экспериментальные данные показывают, что прямая пропорциональная зависимость будет также наблюдаться между элементами, входящими в состав солей, с более высокой растворимостью, чем галит. Например, между кальцием, бромом, литием и стронцием.

Характерно, что при одном и том же соотношении катионов наблюдается различная зависимость. Например, при соотношении Na>Ca>Mg между хлором и другими элементами отмечается вначале прямая пропорциональная зависимость, а затем — линей-

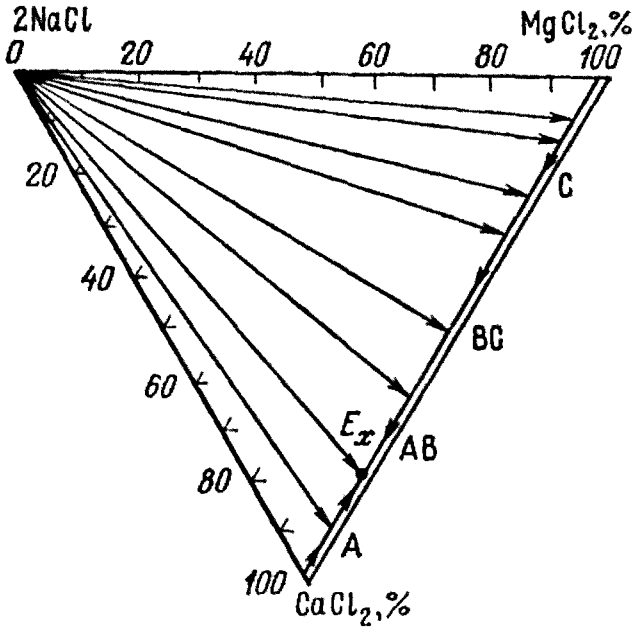


Рис. 14. Изотерма 25 °С системы $NaCl+CaCl_2+MgCl_2+H_2O$ в проекции на плоскость с указанием выпадающих солей.

A — $CaCl_2 \cdot 6H_2O$; B — $CaCl_2 \cdot 2MgCl_2 \cdot 12H_2O$; C — $MgCl_2 \times 6H_2O$

ная. Границей между ними служит начало выпадения галита. На основании этого можно отметить, что все гидрогеохимические классификации рассолов, учитывающие лишь соотношение катионов, а не пределы растворимости солей, не могут считаться корректными, так как в выборку для обобщения автоматически включаются анализы рассолов, состав которых описывается различными функциями.

Поведение микрокомпонентов при концентрировании хлоридной системы в последние годы изучали С. А. Медведев, Н. Ф. Челищев, Ф. И. Шадерман, В. А. Щека. Ими было показано, что литий

Таблица 44

Состав растворов и твердых фаз системы $KCl—MgCl_2—CaCl_2$

T, °C	Жидкая фаза (в % от массы раствора)			Твердая фаза
	KCl	$MgCl_2$	$CaCl_2$	
0	2,13	14,19	16,05	$KCl+KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$
0	1,87	3,3	33,39	$KCl+KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O+CaCl_2 \cdot 6H_2O$
0	1,82	2,98	33,84	$KCl+CaCl_2 \cdot 6H_2O$
0	1,88	3,68	32,99	$KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O+CaCl_2 \times 6H_2O$
35	3,81	27,33	0	$KCl+KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$

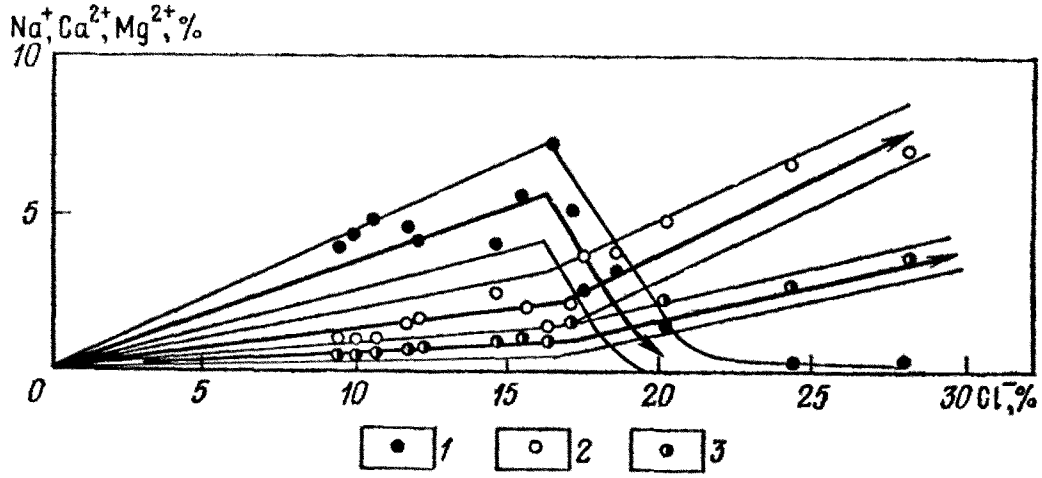


Рис. 15. Концентрирование хлоридной системы в природной обстановке (оз. Красноперекопской группы).

1 — Na^+; *2* — Mg^{2+}; *3* — Ca^{2+}

и стронций накапливаются пропорционально росту содержания кальция; калий, рубидий и цезий выделяются из раствора вместе с калийно-магниевыми солями (табл. 45).

Таким образом, в гомогенной системе, компонентами которой являются Na^+, (K^+), Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, H_2O, при повышенных температурах образуются три фазы: жидкая, твердая

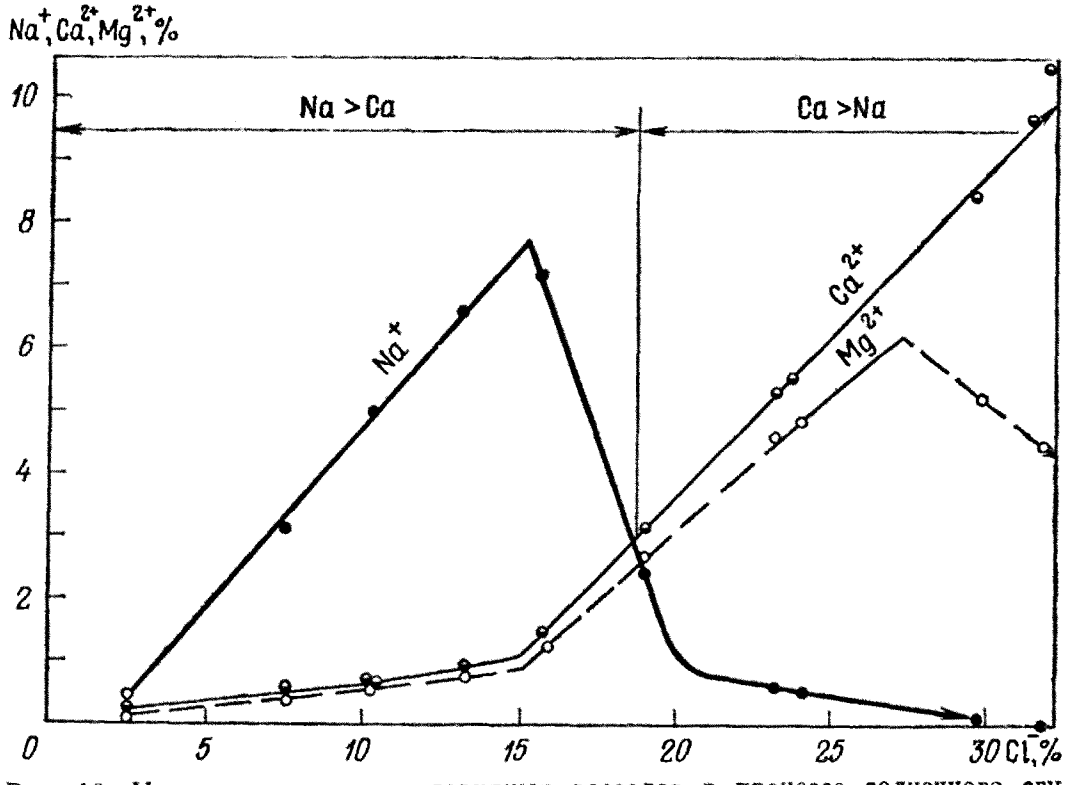


Рис. 16. Изменение состава хлоридных рассолов в процессе солнечного сгущения

Таблица 45

Изменение состава хлоридных рассолов в процессе солнечного сгущения. По С. А. Медведеву, В. А. Щеке

Плотность, г/см³	pH	Ионный состав, %				Солевой состав, %					Концентрации редких элементов, 10^7 %					Стадии сгущения
		Ca	Mg	Na+K	Cl	$CaSO_4$	$(Na+K)Cl$	$CaCl_2$	$MgCl_2$	Σ	Li	Sr	Br	B	I	
1,021	6,8	0,21	0,22	0,46	2,47	0,06	2,46	0,54	0,84	3,9	0,009	0,49	1,11	0,046	0,005	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1,084	7,6	0,52	0,46	3,01	7,55	0,10	7,73	1,32	2,04	11,4	0,025	1,34	3,13	0,13	0,014	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1,130	7,0	0,62	0,57	5,00	10,21	0,28	12,83	1,40	2,21	16,6	0,029	1,57	3,62	0,15	0,016	Гипс
		—	—	—	—	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1,167	6,9	0,88	0,77	6,20	13,12	0,60	15,91	1,97	2,96	21,4	0,055	2,87	6,67	0,27	0,03	Гипс+галит
		1,53	—	—	—	5,28	—	—	—	5,28	—	—	—	0,13	—	
1,202	6,8	1,37	1,27	7,17	15,74	0,78	18,39	3,16	4,87	27,2	0,103	5,36	12,17	0,52	0,055	Галит
		0,28	0,49	14,8	41,38	0,3	65,59	0,62	1,37	67,88	—	—	—	0,16	—	
1,245	5,5	3,11	3,48	2,52	19,09	—	6,48	8,65	13,26	28,2	0,184	10,04	23,8	0,27	0,090	»
		0,58	0,78	27,74	46,58	0,1	71,14	1,52	3,01	75,68	—	—	—	0,17	—	
1,313	4,9	5,30	4,59	0,62	23,29	—	1,59	14,73	17,68	33,8	0,258	14,12	33,43	1,37	0,093	»
		0,89	1,32	29,45	51,48		75,51	2,47	5,06	83,04	—	—	—	0,25	—	
1,347	4,1	6,31	4,82	0,48	24,09	—	1,23	17,51	18,55	35,7	0,296	16,41	39,04	1,59	0,12	Карналлит+тахгидрит
		1,10	1,84	23,95	44,63		61,4	3,06	7,08	71,52	—	—	—	0,31	—	
1,445	3,3	8,38	5,23	0,12	29,87	—	0,32	23,27	20,12	46,3	0,405	20,54	48,66	2,16	0,16	Бишофит+тахгидрит $Ca(Sr)Cl_2 \cdot 6H_2O$, $CaCl_2$, $SrCl_2 \cdot 6H_2O$
		3,84	9,91	6,97	45,46		17,88	10,68	38,12	66,68	—	—	—	0,51	—	

Примечание В числителе — данные жидкой фазы, в знаменателе — твердой.

(соль) и газообразная (пар), то есть наблюдается превращение в гетерогенную систему. В зависимости от соотношения компонентов (карбонатный, сульфатный, хлоридный типы вод), температуры и давления параметры и фазы системы имеют вполне определенное значение, поэтому такой процесс можно изобразить графически на плоскости с помощью диаграмм и графиков зависимости одного компонента от другого. При сохранении внешних условий система будет находиться в состоянии равновесия и, наоборот, с их изменением выйдет из этого состояния. По принципу Ле Шателье равновесие должно смещаться в таком направлении, чтобы уменьшить оказанное воздействие. Наибольшее значение при нарушении равновесия имеют варьирование концентраций веществ, участвующих в равновесии, давлений и температуры.

Так, если в систему с соотношением $Ca^{2+} > SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + 2HCO_3^-$ добавить раствор сульфатов, то неравенство смещается и возможно выпадение малорастворимой соли $CaSO_4$, т. е. в сторону расхода добавляемого вещества.

Следует отметить, что процесс смешения гомогенных растворов, приводящий к изменению состава и выпадению солей, давно изучается в гидрогеологии. Так, например, при смешивании пластовых вод гидрокарбонатного состава с водой хлоридного типа, обогащенной кальцием, наблюдается выпадение карбонатов кальция. В результате этого процесса, возможно, происходит ухудшение коллекторских свойств водоносного горизонта в зонах проявления этого процесса.

Процесс смешения подземных вод был впервые изучен А. Н. Огильви применительно к минеральным водам Северного Кавказа и Мацесты. В результате этих исследований установлено, что при смешении двух вод — пресной и минеральной — химический состав смесей подчиняется прямолинейной зависимости $y = ax + b$, где x и y — содержание двух каких-либо составных частей в данном объеме воды, a и b — параметры, постоянные для этих частей. В настоящее время значительное число экспериментов по изучению смешения пресных и соленых вод приведено П. Р. Ахундовым, Л. С. Балашовым, Е. А. Ворошиловым, Ф. А. Гезаловым, А. М. Кузнецовым, В. А. Лутковым, А. М. Никаноровым и другими исследователями.

Характерно, что конечную гетерогенную систему, включающую две соответствующие фазы, раствор—соль при добавлении H_2O и тепла можно легко перевести в начальное гомогенное состояние (до труднорастворимых солей). Это связано с тем, что вода весьма хороший растворитель солей. Способность воды растворять соли с ростом температуры возрастает, с ее уменьшением — понижается. В зависимости от состава солей и их концентрации в растворе меняется ряд физических свойств воды (Т. В. Одрова). Процессы растворения, например, сопровождаются изменением ее структуры. Это объясняется тем, что ионы в зависимости от состава и температуры создают силовые поля, различно влияющие на расположение молекул воды. Уже при концентрации солей 2 моль/л структура воды становится такой, что раствор ведет себя

как пластичная соль. При этом, естественно, возрастает вязкость раствора. Однако с ростом температуры вязкость и плотность воды уменьшаются.

Все это вместе взятое приводит к гравитационному перераспределению отдельных порций раствора внутри гомогенной системы. В гидрофизике водоемов суши это перемещение известно как гравитационное течение. Расслоение водной толщи по плотности наиболее четко выявляется на озерах и водохранилищах, т. е. на водоемах с замедленным водообменом. Например, при впадении пресных вод рек в соленые озера создаются постоянные поверхностные течения опресненных (менее плотных) речных вод над солеными. В зависимости от плотности вносимые воды могут либо распространяться по поверхности, либо погружаться на глубину до слоя соответствующей плотности.

Таким образом, в гравитационном поле Земли водные растворы седиментационно неустойчивы, что связано с особенностями изменения физических свойств воды под влиянием термодинамических условий, концентраций и природы ионов растворенных солей, то есть ведут себя не как истинные растворы, а напоминают суспензии.

Разность концентраций в пределах различных слоев водного раствора вызывает самопроизвольный процесс перемещения вещества, пропорциональный градиенту концентраций (первый закон Фика). Это приводит к дальнейшему перераспределению веществ внутри гомогенной системы.

Имеется целый ряд экспериментальных работ по исследованию процессов диффузии, которые довольно подробно обобщены в работе С. И. Смирнова [45].

Следует отметить, что в гидрофизике считается, что многие свойства воды и водных растворов, в частности структура воды, изменение кинетических характеристик растворов, особенно диффузионного перераспределения веществ в растворах различных концентраций и т. д., в достаточной степени не исследованы до конца.

В настоящее время накоплен значительный материал по изучению взаимодействия растворов и солей в сульфатной системе, однако, к сожалению, хлоридная система исследована значительно слабее. К гетерогенным системам мы условно относим также раствор — окружающая среда. Это вода—ионы—порода, вода—ионы—газ, вода—ионы—органическое вещество, вода—ионы—породы—газ—органическое вещество. Наиболее важными системами, с которыми приходится иметь дело при изучении седиментационных бассейнов, являются системы вода—ионы—галогенные породы, вода—ионы—сульфатные породы, вода—ионы—карбонатные породы, вода—ионы—терригенные породы и, в частности, вода—ионы—глинистые породы.

Все эти системы в той или иной мере изучались при различных термодинамических условиях. Однако, учитывая направленность книги, мы не приводим обзор данных этих исследований, но при

необходимости используем их результаты в дальнейшем при построении ретроспективных моделей.

Ниже нами проводится анализ подземных вод стратисферы в статическом и ретроспективном аспектах с физико-химических позиций.

ПОДЗЕМНЫЕ СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ РАССОЛЫ КАК ХЛОРИДНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ ПРИУРОЧЕННОСТЬ

В региональном плане основной объем подземной гидросферы осадочных толщ представлен преимущественно седиментационными водами хлоридного типа, которые в большей степени представляют собой концентрированные хлоридные системы, находящиеся в физико-химическом равновесии с окружающей средой. Рассмотрение подземных рассолов с этих позиций позволяет понять значение их литолого-стратиграфической приуроченности и получить эмпирические закономерности более высокого порядка, важные как в практическом, так и теоретическом отношении.

Минерализация подземных седиментационных рассолов СССР достигает 680 г/л (Восточная Сибирь), соответственно степени концентрирования накапливается большинство химических элементов, достигая значительных, порой уникальных величин для природных растворов (табл. 46).

Максимальные концентрации (в мг/л) других элементов приведены ниже:

Железо	$6{,}2 \cdot 10^3$	Цинк	$1{,}7 \cdot 10^2$
Кремний	$3{,}0 \cdot 10^3$	Медь	$3{,}0 \cdot 10$
Алюминий	$3{,}0 \cdot 10^3$	Хром	$2{,}7 \cdot 10$
Марганец	$2{,}0 \cdot 10^3$	Олово	$1{,}6 \cdot 10$
Барий	$1{,}8 \cdot 10^3$	Титан	6,6
Аммоний	$5{,}0 \cdot 10^3$	Серебро	6,5
Никель	$6{,}0 \cdot 10^2$	Германий	$4{,}4 \cdot 10^{-1}$
Свинец	$2{,}4 \cdot 10^2$	Вольфрам	$2{,}2 \cdot 10^{-1}$

Максимальные концентрации элементов приурочены к соленосным отложениям, площадям нефтегазоносности, отдельным тектоническим структурам и чаще всего представляют зоны незначительной протяженности в плане и разрезе. Основные же запасы рассолов имеют состав, характеризующийся значительно меньшими концентрациями. Сравнительный анализ показал, что максимальные концентрации хлора, натрия, кальция, магния и рубидия приурочены к рассолам, залегающим в породах нижнего палеозоя, стронция и цезия — верхнего палеозоя, калия, йода и бора — мезозоя (см. табл. 46). В целом можно отметить, что в рассолах от палеозоя к кайнозою понижается минерализация, уменьшается содержание хлора, кальция, брома и рубидия, однако для магния, калия и стронция это проявляется не очень четко. Содержание же бора и йода от палеозоя к мезозою возрастает, в альпийской зоне содержание этих компонентов так же, как и в рассолах мезозойских отложений, высокое.

Сравнительная характеристика максимальных концентраций (мг/л)

Провинции, возраст водовмещающих толщ	Минерализация	Cl	Na	Ca
Восточно-Сибирская, PZ_1	$6{,}8 \cdot 10^5$	$5{,}3 \cdot 10^5$	$1{,}2 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^5$
Русская, PZ_2	$5{,}0 \cdot 10^5$	$3{,}2 \cdot 10^5$	$1{,}2 \cdot 10^5$	$1{,}4 \cdot 10^5$
Скифско-Туранская, MZ	$5{,}9 \cdot 10^5$	$3{,}6 \cdot 10^5$	$1{,}2 \cdot 10^5$	$1{,}1 \cdot 10^5$
Бассейны кайнозойского возраста	$4{,}1 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^5$	$0{,}6 \cdot 10^5$	$0{,}2 \cdot 10^5$

С физико-химических позиций прежде всего целесообразно рассмотреть состав седиментационных растворов галогенных толщ, которые большинство исследователей по общим гидрогеологическим данным считают маточными рассолами, а по изотопным — морскими концентрированными водами.

Растворы соленосных толщ широко развиты в Восточной Сибири, Белоруссии, Украине, Казахстане, Оренбургской области, на юге Средней Азии. Необходимо отметить, что связь высококонцентрированных рассолов седиментационных бассейнов с галогенными формациями была отмечена И. К. Зайцевым в 1959 г., М. Г. Валяшко в 1963 г. и С. И. Смирновым в 1966 г. Они считают эту связь генетической. Кроме того, более подробный анализ, проведенный В. М. Поповым, показал соответствие химического состава рассолов и солей одновозрастных толщ одноименным физико-химическим системам, а также закономерное изменение состава рассолов в стратиграфической последовательности.

Состав седиментационных рассолов галогенных толщ, т. е. растворов внутри солей, сохранившихся со времени отложения, приведен в табл. 47 (рис. 17). Анализ данных показывает, что химический состав седиментационных рассолов солей Восточной Сибири (Иркутская область), солеродных бассейнов силура (Якутская АССР) и девона (Белорусская ССР) характеризуется хлоридным типом вод с отношением $r\mathrm{Ca}/r\mathrm{Mg}$ более 1. В солях пермского времени Верхнекамской впадины отмечаются только хлоридные растворы (8—10), а в пермских солях восточной части Прикаспийской впадины как хлоридные, так и сульфатные растворы. Рассолы солей юрского возраста Туркменской ССР вновь характеризуются хлоридным составом вод с неустойчивым значением отношения $r\mathrm{Ca}/r\mathrm{Mg}$. Рассолам неогеновых солей свойствен сульфатный состав вод.

Приведенный фактический материал показывает четкое уменьшение значений отношения $r\mathrm{Ca}/r\mathrm{Mg}$ от кембрия к неогену от 6,8 до 0. Данные по водным микровключениям в солях, полученные О. И. Петриченко, подтверждают эту закономерность, а также сви-

Таблица 46

некоторых химических элементов в подземных рассолах СССР

Mg	K	Br	I	Sr	B_2O_3	Rb	Cs
$1,4 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^4$	32	$8,8 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^2$	3
$1,2 \cdot 10^5$	$6,0 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^3$	96	13
$0,7 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^4$	$0,25 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^3$	55	12
$0,8 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^4$	$4,7 \cdot 10^2$	$2,4 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^3$	6,3	1,7

детельствуют о соответствии состава рассолов и солей одноименным физико-химическим системам концентрирования.

Состав под- и межсолевых рассолов (табл. 48), развитых значительно шире, чем предыдущие, соответствует составу внутрисолевых рассолов. Из табл. 48 видно, что состав рассолов также хлоридный с преобладанием кальция над магнием, за исключением рассолов пермских и частично юрских отложений. По данным Ю. Б. Селецкого, В. И. Ферронского и других исследователей, эти рассолы представляют собой концентрированные морские воды. В стратиграфическом отношении в них также наблюдается тенденция к уменьшению отношения $r\mathrm{Ca}/r\mathrm{Mg}$.

Гидрогеохимики давно отметили зависимость концентрации рассолов от геологического возраста пород. Так, например, В. А. Кротова обратила внимание на то, что во времени происходит падение минерализации и концентрации кальция. А. Е. Бабинец показал, что отношение $r\mathrm{Na}/r\mathrm{Cl}$ для седиментационных рассолов Украины изменяется следующим образом: девон 0,56, карбон 0,76, пермь 0,83, триас 0,86. По данным В. В. Красинцевой, снижение отношения Cl/Br в подземных водах происходит по мере увеличения возраста водовмещающих толщ, при этом на одинаковой глубине в отложениях различного геологического возраста наблюдаются разные значения этого коэффициента. Интересно и то, что низкие значения коэффициента в водах древних толщ В. В. Красинцева связывает с водами седиментационных бассейнов прошлого.

А. С. Панченко обращает внимание на уменьшение содержания кальция и увеличение магния в седиментационных рассолах от древних к современным толщам. По его данным, содержание магния меняется от 13 % в рассолах кембрийских солей до 85 % в рассолах кайнозойских солей. Содержание кальция в рассолах соответственно уменьшается от 83 % в кембрийских солях до 12 % в кайнозойских. В результате этого среднее значение отношения Ca/Mg меняется от 6,1 в рассолах палеозоя до 0,2 в современных рассолах концентрирования.

Таблица 47

Химический состав седиментационных рассолов некоторых соляных толщ СССР

Номер анализа	Возраст солей	М, г/л	Химический состав	Тип вод, по М. Г. Валяшко	r Ca/r Mg	Cl/Br
			Иркутская область			
1	$\in_1$	535	$\frac{Cl\ 91\ Br\ 1}{Ca\ 81\ Mg\ 13}$	Хлоридный	6,2	38
2	$\in_1$	542	$\frac{Cl\ 99\ Br\ 1}{Ca\ 75\ Mg\ 11\ Na\ 8\ K\ 5}$	»	6,8	41
3	$\in_1$	599	$\frac{Cl\ 99\ Br\ 1}{Ca\ 78\ Mg\ 12\ K\ 5\ Na\ 5}$	»	6,5	34
			Якутская АССР			
4	S	>383	$\frac{Cl\ 99\ Br\ 1}{Ca\ 71\ Na\ 16\ Mg\ 12}$	»	4,4	52
			Белорусская ССР			
5	D_3	383	$\frac{Cl\ 99}{Na\ 49\ Ca\ 29\ K\ 12\ Mg\ 9}$	»	3,1	104
6	D_3	384	$\frac{Cl\ 99}{Ca\ 40\ Na\ 28\ Mg\ 27\ K\ 5}$	»	2,3	88
7	D_3	412	$\frac{Cl\ 99}{Ca\ 62\ Mg\ 24\ Na\ 8\ K\ 6}$	»	2,6	100
			Верхнекамская впадина			
8	P_1	382	$\frac{Cl\ 99\ Br\ 1}{Mg\ 58\ Ca\ 21\ Na\ 14\ K\ 6}$	»	<1	44
9	P_1	406	$\frac{Cl\ 98\ Br\ 2}{Mg\ 52\ Ca\ 30\ Na\ 10\ K\ 7}$	»	<1	25
10	P_1	>410	$\frac{Ca\ 98\ Br\ 2}{Mg\ 71\ Ca\ 17\ K\ 9\ Na\ 3}$	»	<1	27
			Прикаспийская впадина			
11	P_1	>300	$\frac{Cl\ 96\ SO_4\ 2}{Mg\ 58\ Na\ 34\ K\ 8}$	Сульфатный	0	38
12	P_1	359	$\frac{Cl\ 97\ SO_4\ 1{,}5}{Mg\ 69\ Na\ 26\ K\ 5}$	То же	0	50
13	P_1	382	$\frac{Cl\ 99\ SO_4\ 0{,}2}{Mg\ 85\ K\ 7\ Na\ 5\ Ca\ 3}$	Хлоридный	<1	300

Продолжение табл. 47

Номер анализа	Возраст солей	М, г/л	Химический состав	Тип вод, по М. Г. Валяшко	r Ca/r Mg	Cl/Br
			Туркменская ССР			
14	J_3	>384	$\frac{Cl\ 100}{Ca\ 55\ Mg\ 44}$	То же	>1	215
15	J_3	>410	$\frac{Cl\ 99}{Mg\ 69\ Ca\ 20\ Na\ 6\ K\ 5}$	„	<1	117
			Украинская ССР			
16	N	>407	$\frac{Cl\ 91\ SO_4\ 8}{Mg\ 90\ Na\ 7\ K\ 2}$	Сульфатный	0	55
17	N	410	$\frac{Cl\ 89\ SO_4\ 10}{Mg\ 85\ Na\ 8\ K\ 6}$	То же	0	50
18	N	407	$\frac{Cl\ 90\ SO_4\ 10}{Mg\ 85\ Na\ 9\ K\ 5}$	„	0	Нет св.

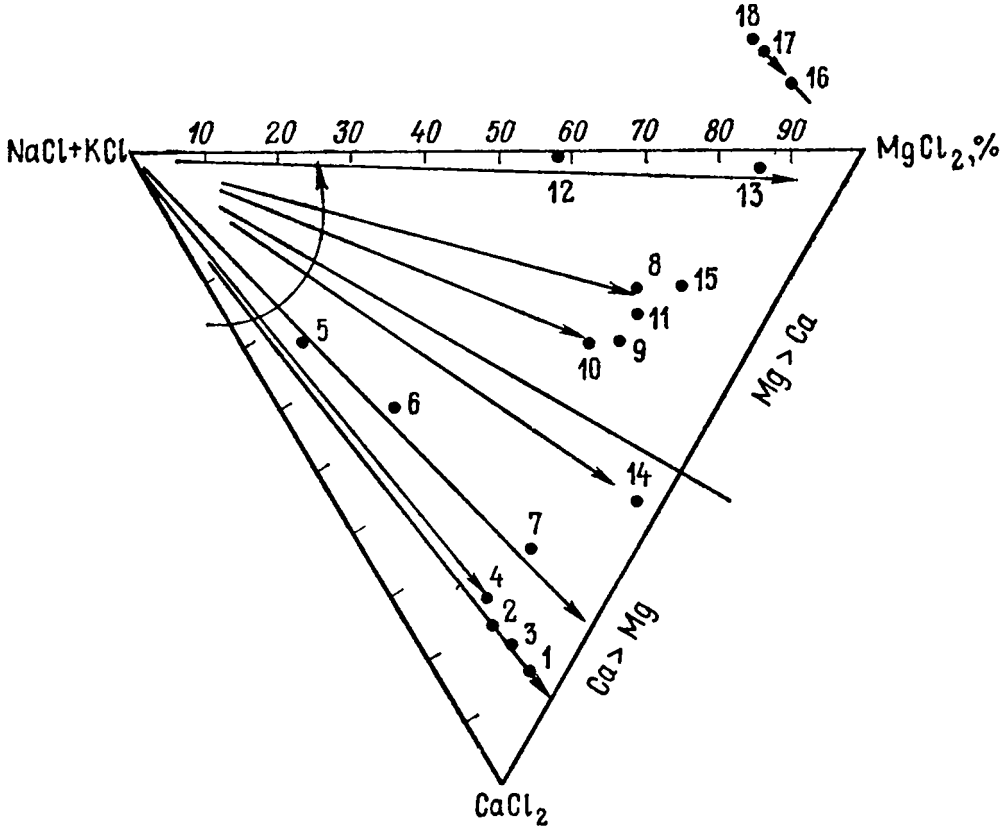


Рис. 17. Диаграмма хлоридного типа вод с нанесением фигуративных точек состава седиментационных рассолов соляных толщ и возможных путей их кристаллизации.

Цифрами на рисунке даны номера анализов (см. табл. 47)

Таблица 48

Химический состав рассолов меж- и подсолевых отложений территорий СССР

Возраст водовмещающих пород	Скважина, ее номер	М, г/л	Химический состав	r Ca/r Mg	Источник
			Ангаро-Ленский бассейн		
ϵ	Усольская, 15	347	$\frac{Cl\ 99}{Ca\ 40(Na+K)39\ Mg\ 17}$	>1	Г. М. Белоозерова, 1967 г.
ϵ	Северо-Тулунская, 1	402	$\frac{Cl\ 99}{(Na+K)59\ Ca\ 34\ Mg\ 11}$	>1	То же
ϵ	Азейская, 1	423	$\frac{Cl\ 99}{Ca\ 52(Na+K)19\ Mg\ 19}$	>1	»
			Припятский бассейн		
D_3	Ельская, 23	344	$\frac{Cl\ 99}{Ca\ 46(Na+K)43\ Mg\ 9}$	>1	Г. В. Богомолов и др., 1970 г.
D_3	Осташковичская, 25	372	$\frac{Cl\sim 100}{Ca\ 52(Na+K)37\ Mg\ 8}$	>1	То же
D_3	Кустовницкая, 1	416	$\frac{Cl\sim 100}{Ca\ 70(Na+K)18\ Mg\ 10}$	>1	»
			Прикаспийский бассейн		
P_1	Ташла, 3	315	$\frac{Cl\ 99}{Mg\ 58(Na+K)42}$	<1	К. Е. Питьева, 1971 г.
P_2	Ташла, 1	300	$\frac{Cl\ 99}{Mg\ 83(Na+K)11\ Ca\ 6}$	<1	В. В. Красинцева, 1968 г
			Каракумский бассейн		
K_1	Марыйская, 7	350	$\frac{Cl\ 100}{(Na+K)70\ Ca\ 21\ Mg\ 9}$	>1	Л. Г. Соколовский, 1970 г.
K_1—J_3	Байрамалинская, 9	444	$\frac{Cl\ 99}{Ca\ 67(Na+K)18\ Mg\ 15}$	>1	В. И. Седлецкий, 1970 г.

Примечание. Тип вод — хлоридный.

Проверка характера изменения отношения $r\mathrm{Ca}/r\mathrm{Mg}$ рассолов в стратиграфической последовательности показывает, что эта величина уменьшается от кембрия к неогену, однако общая картина более сложная: до перми среднее значение этого коэффициента, как правило, больше 1, но для рассолов пермского времени и мезо-кайнозоя наблюдается значительный разброс.

Более детальный анализ химического состава хлоридных подземных рассолов СССР, проведенный нами, показывает, что седиментационные рассолы донеогеновых одновозрастных водовмещающих толщ могут быть рассмотрены как концентрированные хлоридные системы с характерными отношениями натрия, кальция, магния, калия, брома, лития, рубидия, стронция, бора к хлору и кальция к магнию, литию, брому, стронцию. При переходе от древних водоносных комплексов к более молодым в химическом составе рассолов относительно хлора происходит возрастание содержаний натрия и уменьшение концентраций кальция, калия, брома, стронция, лития и рубидия. Сравнение состава седиментационных рассолов палеозойских одновозрастных коллекторских толщ СССР показывает близость значений отношения кальция к магнию и величин относительных концентраций макро- и микрокомпонентов.

Рассмотрим наиболее древние под- и межсолевые рассолы Ангаро-Ленского бассейна, химический состав которых приведен в табл. 49. Графическая обработка этих данных показывает, что высокоминерализованные рассолы этого региона могут рассматриваться как хлоридная система со средним значением отношения кальция к магнию 7,3 (рис. 18). Она может быть описана двумя функциями: $y=kx$ и $y=kx-b$. На основании графика можно заключить, что рассолы до выпадения галита (функция $y=kx$) при содержании хлора 150 г/л характеризуются значениями натрия 65 (51—82)*, кальция 22 (12—30) и магния 3 (1,8—5) г/л. Значения отношения хлора к натрию соответственно составят $2{,}3\pm0{,}5$, хлора к кальцию 7 ± 2, хлора к магнию 50 ± 30, натрия к хлору $0{,}4\pm0{,}1$, натрия к кальцию 3, натрия к магнию 22, кальция к хлору $0{,}14\pm0{,}006$, кальция к натрию 0,34, кальция к магнию 7,3.

Подтверждением концентрированного характера хлоридной системы служит пропорциональное возрастание значений всех микрокомпонентов относительно кальция, т. е. самого устойчивого макрокомпонента хлоридного раствора.

На графике зависимости брома от кальция пропорциональность значений этих компонентов прослеживается постоянно. При 70 г/л кальция концентрация брома равна 4,5 (3,4—5,8) г/л. Отношение кальция к брому соответственно составит 15,5 (12—20).

Содержание калия также возрастает пропорционально кальцию. Однако при выпадении калиевых минералов его концентрация должна уменьшаться. Это наблюдается при содержании каль-

* Здесь и далее в скобках даны предельные значения.

Таблица 49

Химический состав под- и межсолевых рассолов кембрийских отложений Ангаро-Ленского бассейна. По Е. В. Пиннекеру

Скважина, ее номер	Интервал опробования, м	Сухой остаток, г/л	Содержание, г/л						
			Na	K	Ca	Mg	Cl	I	Br
Тангуйская, 1	2600	311,9	101,7	2,6	16,9	0,15	188,8	Следы	0,8
Заярская, 1	2608—2615	312	85,8	5,0	29,3	0,5	190	0,0008	1,1
Тулунская, 1	2785—2795	325	79,6	7,0	31,7	4,8	196,8	Следы	3,3
То же	2841—2865	330	79,5	6,0	32,7	5,9	203,1	»	2,4
Усольская, 1-Б	1790—1850	347	55,3	7,6	49,4	12,9	215,1	0,002	4,2
Атовская, 7	2040—2085	368	74,2	9,8	51,6	3,7	224,5	0,005	3,1
Осинская, 9	1670—1676	363	54,8	9,3	64,3	6,4	221,5	Следы	4,5
Таныесская, 1	721—756	373	43,9	39,7	45,8	14,3	227,5	»	3,2
Шелонинская, 1	2510—2535	367	25,0	4,8	85,6	12,8	231,9	0,004	7,0
Тыретская, 9	2349—2368	380,9	59,3	3,6	64,6	10,6	237,8	0,001	4,9
Христофоровская, 1	2205—2215	381,9	31,7	18,2	84	7,4	235,8	0,004	4,3
Тыретская, 1	2183—2203	381,9	23,6	2,9	88,4	16,7	245	—	4,6
Атовская, 2	1934—1983	387,2	54,1	17,1	69,5	6,1	235,8	0,006	3,8
Зиминская, 31	422—458	412,1	8,06	13,4	115,8	11,7	256,8	0,006	6,2
Азейская, 1	2624—2655	422,7	33,6	6,1	89,8	17,8	267,5	0,001	6,5
Осинская, 9	1890—1900	423,8	19,0	17,8	109,2	9,1	262,7	Следы	5,3
Половинская, 1	626—640	197,8	59,4	2,5	9,2	2,9	117,3	»	0,7
То же, 4	630—654	200,0	63,7	—	8,8	3,0	120,4	»	0,6
Малая Ерма, 3	650	38,4	9,6	0,04	3,6	0,8	22,5	»	0,4
Нукутская	425—435	57,3	18,3	0,1	2,5	0,5	30	0,001	0,14
Тыптинская, 1	2927—2940	300,0	63,0	1,0	39,0	6,9	185	—	4,5
Парфеновская, 1	2325—2426	336,0	69,2	3,6	47,5	8,1	203,1	0,008	4,1
Нукутская, 1	2207—2226	331,6	51,9	2,1	57,4	9,2	210,3	—	0,4
Тыретская, 4	2160—2180	394,1	36,8	3,5	84,1	14,6	248,5	0,026	6,9

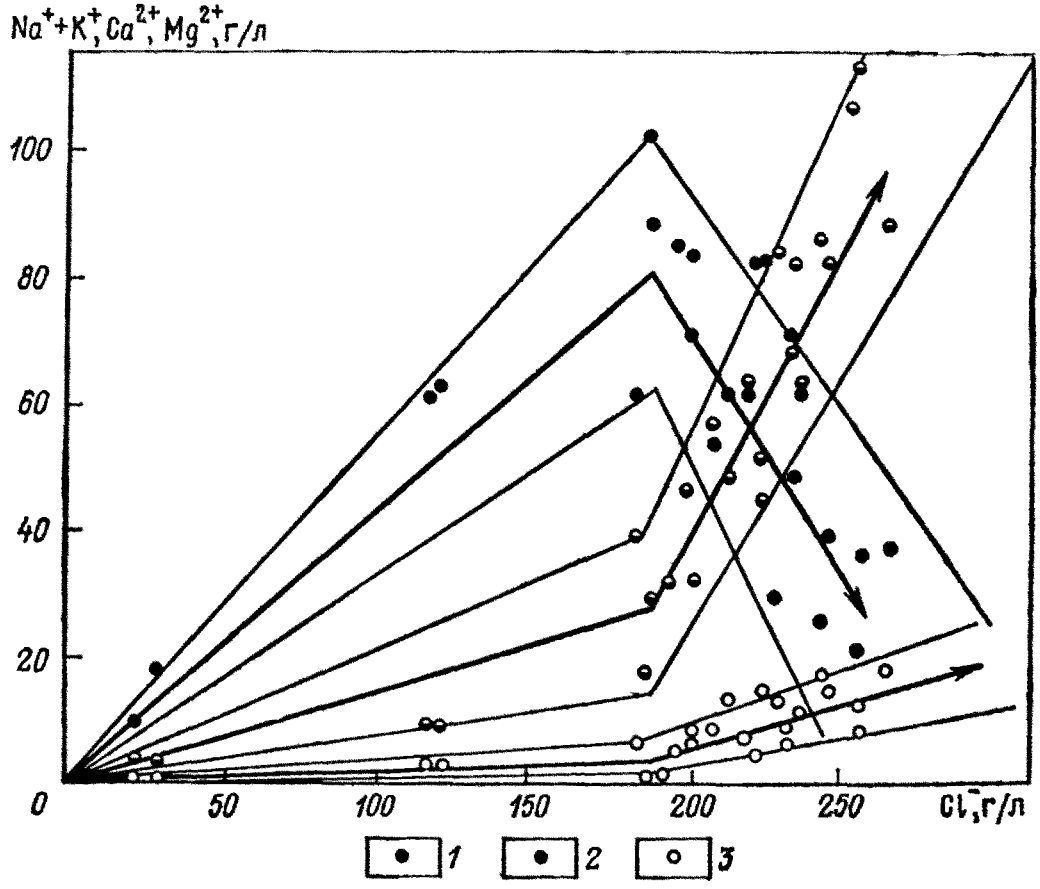


Рис. 18. График химического состава под- и межсолевых рассолов Ангаро-Ленского бассейна.

1 — $Na^+ + K^+$; *2* — Ca^{2+}; *3* — Mg^{2+}

ция более 80 г/л. При 70 г/л кальция значения для калия равны 14 (10—18,4) г/л. Отношение кальция к калию составляет 5 (3,8—7). Зависимость йода от кальция практически не обнаруживается, содержания йода незначительны.

Используя данные Г. М. Белоозеровой и П. И. Трофимука, мы провели графическую обработку зависимости содержаний лития, рубидия, стронция и бора от кальция. Содержание стронция при 70 г/л кальция равно 3150 (2610—3800) мг/л. Отношение кальция к стронцию составляет 22 ± 5.

Концентрации лития при 70 г/л кальция колеблятся от 1—2,2 усл. ед/л. Отношение кальция к литию равно 320—750. Причем максимальные концентрации лития встречены в доломитах и солях, а минимальные — в терригенной толще.

Средние значения некоторых коэффициентов пропорциональности для функции ($y = kx$), характеризующей хлоридные рассолы водоносного комплекса кембрийских отложений Ангаро-Ленского бассейна, приведены ниже.

Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca
Cl	Mg	Na	K	Br	Sr	Rb
0,14	7,3	0,34	3,8	15,5	22	1800
Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl
Na	Ca	Mg	K	Br	Sr	Rb
2,3	7	50	26,6	108	150	$1{,}2\cdot10^4$

Такой же состав рассолов характерен и для пор терригенных и карбонатных пород (табл. 50). Химический состав водных вытяжек из этих пород показывает, что содержание кальция во всех пробах больше, чем магния.

Чтобы проследить наличие ранее отмеченных закономерностей в других седиментационных бассейнах раннего палеозоя, рассмотрим данные анализов рассолов Печорского и Львовского артезианских бассейнов. Рассолы ордовик-силурийских отложений Печорского бассейна приурочены к карбонатным и терригенным отложениям. Распределение химических элементов в этих рассолах характеризуется функцией $y=kx$ [2]. При значении хлора 150 г/л концентрация натрия составляет 65 (56—72), кальция 21,5 (16—28), магния 3,5 (2—5) г/л. Средние значения некоторых коэффициентов пропорциональности ($k=y/x$) для этих рассолов приведены ниже.

Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca
Cl	Mg	Na	K	Br	Sr	Rb
0,14	6,2	0,33	2–5	23 (15–33)	20—40	1155—3000
Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl
Na	Ca	Mg	K	Br	Sr	Rb
2,3	7±2	43	20—70	156 (133–188)	140—390	$13\cdot10^3$

Сравнение показывает, что рассолы ордовик-силурийских отложений Тимано-Печорской провинции и кембрийских отложений Ангаро-Ленского бассейна характеризуются довольно близкими значениями коэффициентов пропорциональности в функциях $y=kx$. Однако в них намечается незначительная тенденция к уменьшению отношения Ca/Mg и обеднению калием, бромом и рубидием, что, безусловно, связано с различием условий формирования рассолов раннепалеозойских отложений этих регионов. Г. А. Голева приводит наиболее характерные соотношения элементов для подземных рассолов терригенных и карбонатных отложений раннего палеозоя (кембрий, силур) Львовского артезианского бассейна. Данные показывают, что эти рассолы характеризуются довольно стабильными отношениями Ca/Sr, Cl/Br, Na/Cl и Ca/Mg, т. е. в данном случае также наблюдается прямая пропорциональная зависимость. Однако здесь, как и для Тимано-Печорской провинции, намечаются определенные отклонения по содержанию микроэлементов, по сравнению с рассолами Ангаро-Ленского бассейна, что находит

Таблица 50

Состав поровых растворов и подземных рассолов, полученных из одних и тех же горизонтов. По Е. В. Пиннекеру

Скважина, ее номер	Интервал опробования, м	Минерализация, г/л	Формула химического состава	Содержание элементов, г/л	
				K	Br
Шелонинская, 5—5(2)	475—476 (476—499)	437(473)	$\frac{Cl\ 98\ (99)}{Ca\ 45\ (53)\ Mg\ 43\ (36)}$	19,3(19,02)	6,31(6,4)
Тыретская, 11(6)	1665—1702 (1675—1730)	761(537)	$\frac{Cl\ 97\ (99)}{Ca\ 76\ (82)\ Mg\ 14\ (13)}$	43,7(15,7)	11,8(8,8)
Тыретская, 11(11)	2203—2210 (2200—2220)	725(378)	$\frac{Cl\ 98\ (99)}{Ca\ 60\ (72)\ Mg\ 21\ (22)}$	16,9(3,9)	10,9(6,8)
Марковская, 15(9)	2526—2527 (2503—2523)	368(292)	$\frac{Cl\ 98\ (99)}{Ca\ 39\ (37)\ Na\ 29\ (57)}$	11,9(1,2)	4,2(1,2)

Примечание. В скобках приведены данные по подземным рассолам.

свое естественное объяснение при рассмотрении условий формирования этих рассолов.

Значения отношения Ca/Sr для рассолов кембрийских отложений юго-западной окраины Русской платформы, составляющие 21,4—22,6, а для Ангаро-Ленского бассейна 22, практически совпадают. Отношение хлора к брому для рассолов раннепалеозойских отложений Русской платформы составляет 85—125, для Ангаро-Ленского бассейна 108, Печорского 156, соответственно отношения кальция к магнию в среднем равны 7,1—7,4; 7,3; 6,2. Однако уже эти данные позволяют говорить о том, что рассолы отложений (галогенные, терригенные и карбонатные) раннего палеозоя характеризуются довольно близкими значениями коэффициентов пропорциональности в описывающей их функции $y=kx$. Учитывая доказанность седиментационного характера рассолов галогенных толщ, их характеристика в дальнейшем нами условно приводится как средняя для отложений раннего палеозоя.

По аналогичной методике обработаны данные Г. В. Богомолова, А. В. Кудельского, М. В. Козлова, Л. С. Балашова и других исследователей по под-, меж- и внутрисолевым рассолам девона Припятской впадины. Эти рассолы представляют собой концентрированную хлоридную систему, распределение элементов в которой преимущественно описывается двумя функциями $y=kx$ и $y=kx-b$ (рис. 19). Из графика видно, что рассолы при функции $y=kx$ (до выпадения галита) при содержании хлора 150 г/л характеризуются значениями натрия 75 (60—91), кальция 16,7 (8,7—25,2), магния 1,5—5 г/л.

Средние значения некоторых коэффициентов пропорциональности для функций $y=kx$, характеризующих хлоридные рассолы водоносного комплекса девонских отложений Припятского бассейна, приведены ниже.

Ca/Cl	Ca/Mg	Ca/Na	Ca/K	Ca/Br	Ca/Sr	Ca/Rb
0,11	5,6	0,22	8	23	28	1300
Cl/Na	**Cl/Ca**	**Cl/Mg**	**Cl/K**	**Cl/Br**	**Cl/Sr**	**Cl/Rb**
2	9	50	72	208	252	$1{,}2\cdot10^4$

Для сравнения рассмотрим данные по рассолам терригенных девонских отложений Печорского артезианского бассейна. Распределение химических элементов в этих рассолах описывается функцией $y=kx$ (рис. 20). Средние значения коэффициентов пропорциональности близки к значениям, приведенным для Припятской впадины.

Следует отметить, что многие исследователи давно обратили внимание на постоянство определенных отношений некоторых элементов в рассолах девонских отложений Русской платформы. Так, В. А. Кротова отмечает, что для рассолов терригенного девона Волго-Уральской области, залегающих в хорошо закрытых струк-

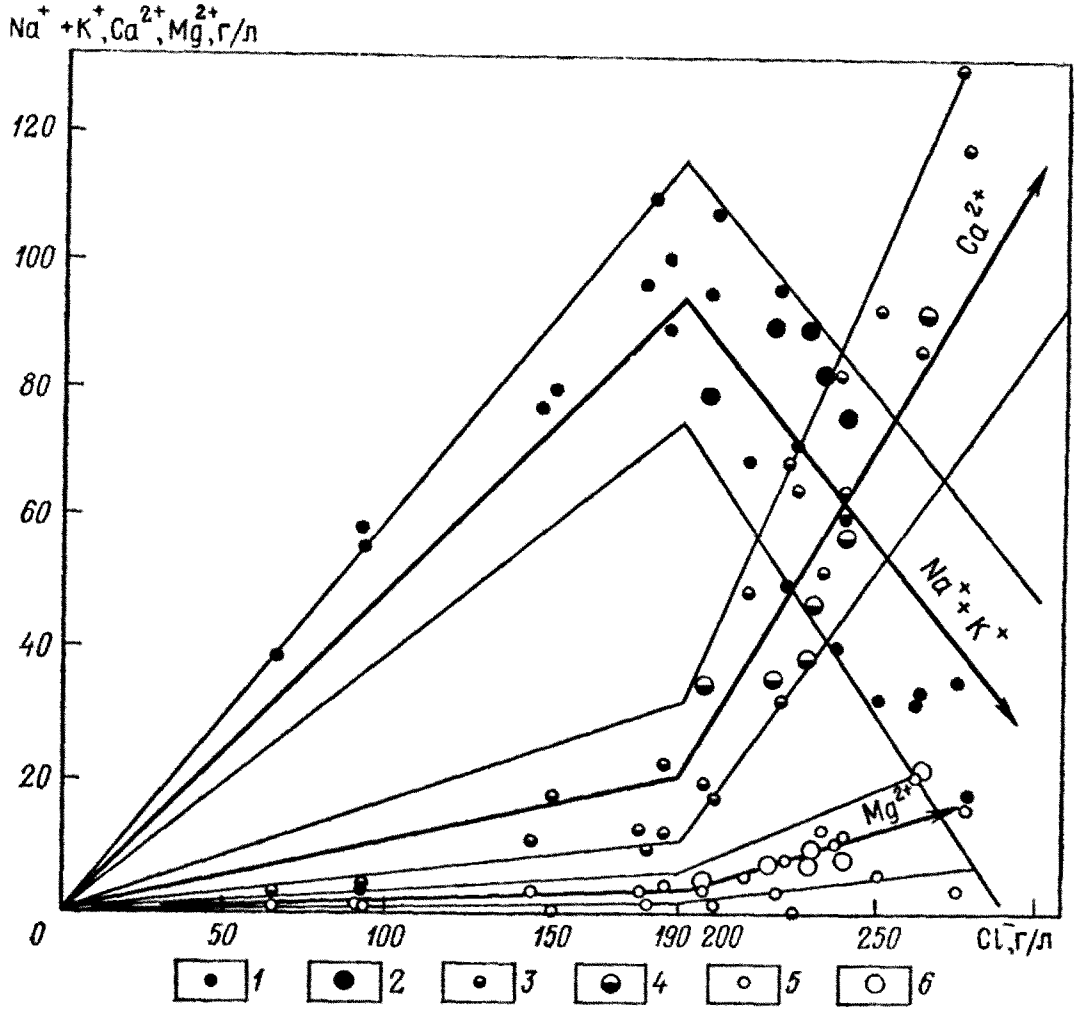


Рис. 19. График химического состава под-, меж- и внутрисолевых рассолов Припятского бассейна.

Под- и межсолевой состав рассолов: *1* — $Na^+ + K^+$, *2* — Ca^{2+}, *3* — Mg^{2+}; внутрисолевой: *4* — $Na^+ + K^+$, *5* — Ca^{2+}, *6* — Mg^{2+}

турах, значение Na/Cl сохраняется в пределах 0,42—0,49, а Cl/Br — менее 100. Б. В. Озолин указывает на приблизительно постоянное значение Ca/Br, равное 24, для рассолов терригенных отложений среднего девона. Г. Н. Куниной составлена карта отношений Ca/Br для рассолов терригенных отложений девона Русской платформы. Этот коэффициент обычно равен 22—30, но в зонах разломов, впадин и углублений в фундаменте его значение повышается до 50 и более. Для рассолов галогенных толщ Припятского бассейна отношение Ca/Br также равно 23; это еще раз подтверждает, что этот коэффициент для разных регионов практически совпадает.

Одной из важных характеристик хлоридной системы, как известно, является отношение Ca/Mg. Для рассолов девонских отложений Тимано-Печорской провинции эта величина в среднем составляет 4,5—6,8, для под-, меж- и внутрисолевых рассолов де-

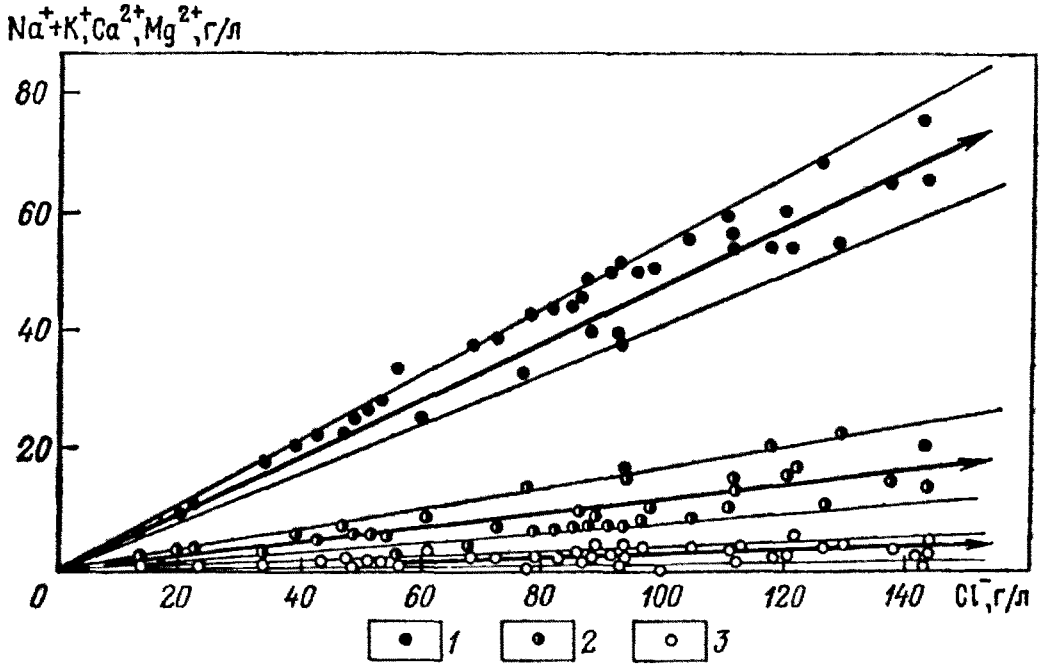


Рис. 20. График химического состава хлоридных рассолов девонских отложений Печорского артезианского бассейна.
1 — $Na^+ + K^+$; *2* — Ca^{2+}; *3* — Mg^{2+}

вонских отложений 5,6. Отношение Ca/Sr, предложенное А. П. Виноградовым для распознавания генезиса вод, также довольно стабильно для седиментационных рассолов девонских отложений. Его значения для Припятского и Печорского бассейнов соответственно равны 28 и 30.

Приведенные данные позволяют определенно говорить о сопоставимости характеристик составов седиментационных рассолов нижней части позднего палеозоя на значительной части территории Русской платформы. По ряду редких щелочных элементов, йоду и бору наблюдаются некоторые отклонения, объясняемые особенностями накопления этих элементов в седиментационных бассейнах.

Рассолы отложений карбона и перми Русской платформы также представляют собой концентрированные системы, распределение элементов в которых преимущественно подчиняется зависимости $y=kx$ с той же тенденцией к уменьшению отношения Ca/Mg.

В. А. Кротова пишет, что в Волго-Уральской области, Прикаспийской и Днепровско-Донецкой областях отношения Na/Cl и Cl/Br закономерно уменьшаются от перми к карбону. Однако, как уже отмечалось выше, состав рассолов пермских солей, особенно в Прикаспийской впадине, существенно изменяется по площади. Так, в Печорском бассейне, по В. Россоху, встречаются рассолы, распределение элементов в которых подчиняется зависимости $y=kx-b$, т. е. это рассолы солевых толщ. Отношение Ca/Mg равно 3,8. В Верхнекамской впадине солевые рассолы пермских

солей при хлоридном составе характеризуются отношением Ca/Mg как большим, так и меньшим 1. В Прикаспийской впадине встречаются рассолы и хлоридного, и сульфатного состава. Причем сульфатный состав рассолов наблюдается в большей степени в восточной части территории. Рассолы хлоридного состава характеризуются преимущественно отношением Ca/Mg меньше 1, но встречаются весьма крепкие хлоридные рассолы со значением этого коэффициента больше 1. Характерно, что весьма крепкие рассолы хлоридного состава Прикаспийской впадины с содержанием $Mg > Ca$ имеют повышенные содержания калия, рубидия, цезия, брома, бора и пониженные содержания стронция. Весьма крепкие рассолы с содержанием $Mg < Ca$ мало чем отличаются от рассолов девонских отложений Припятской впадины, если учесть наблюдающуюся тенденцию к уменьшению значений Ca/Mg, брома, калия, стронция и рубидия в концентрированной системе от кембрия к перми.

На основании такого рассмотрения хлоридных рассолов палеозойских отложений нами в свое время сделано заключение, что в седиментационных рассолах от кембрия к перми наблюдаются постепенное увеличение содержания натрия и уменьшение концентраций кальция, калия, брома, стронция и рубидия. Так как рассолы представляют собой концентрированные хлоридные системы, то эта закономерность обусловлена изменением состава исходных седиментационных вод. Отклонение от этой закономерности, наблюдаемое для рассолов кунгурских отложений Прикаспийской впадины, было объяснено в работе В. М. Попова с позиции поверхностной метаморфизации исходных хлоридных рассолов за счет привноса сульфатов в седиментационные бассейны в период вулканической и гидротермальной активизации Урала. Следует особо обратить внимание, что составы солевых рассолов и рассолов карбонатных и терригенных одновозрастных толщ палеозоя хорошо сопоставимы, но в терригенных толщах наблюдается некоторое обеднение рассолов калием, бромом, рубидием и цезием.

Прослеживая изменения состава хлоридных рассолов в стратиграфической последовательности, рассмотрим химический состав межсолевых седиментационных рассолов и рассолов терригенных и карбонатных толщ юрского возраста Предкавказья и Средней Азии. Результаты обработки данных Л. Г. Соколовского, В. И. Седлецкого, А. С. Хасанова, Л. А. Калабугина, С. Г. Свинцкого, Я. А. Ходжакулиева и И. Г. Киссина показали, что межсолевые рассолы этих регионов представляют собой хлоридные системы с отношением Ca/Mg равным 2,4 (2—5), распределение элементов в которых может быть охарактеризовано двумя функциями $y = kx$ и $y = kx - b$ (табл. 51). Составы рассолов терригенных и карбонатных толщ могут быть описаны функцией $y = kx$ с различными коэффициентами пропорциональности. В Средней Азии этой функцией характеризуются рассолы с содержанием $Cl > 100$ г/л, при меньшем его содержании наблюдается значительное нарушение этой зависимости: весьма существенный разброс значений натрия

Таблица 51

Химический состав межсолевых рассолов юрских отложенй Предкавказья и Средней Азии

Скважина, ее номер	Интервал опробования, м	Минерализация, г/л	Содержание*, г/л					
			Na+K	Ca	Mg	Cl	I	Br
Предкавказье								
Кошехабльская, 10	4828—4840	335,2	89,5	32,1	3,9	207,7	42,3	1160
То же	4700—4713	309,5	79,9	25,2	9,2	194,3	38,8	1225
Ярославская, 5	2676	349,5	36,8	55,5	26,1	230,5	63,4	692
Средняя Азия								
Зевардинская, 1	2226	493,6	34,9	46,5	29,7	276,6	45	1590
То же	542—2200	386,5	40,8	50,5	30,6	215,5	96,3	390
Нишанская, 1	2783	362	51,8	18,6	18,2	216,2	12	1388
Сахарская, 1	2362	412	42,3	55,2	14,4	239,0	22	1431
Керкидагская, 4	2908	540	5,7	108,4	54,5	362,6	13	1742
Шараплинская, 4	2782—2560	349	60,0	64,8	3,0	215,4	10	1076
То же, 1	2738—2678	417	31,0	106,3	15,3	269,8	100	460
Майская, 1	3546	348	66,0	51,3	6,6	211,5	32	1142
Байрамалинская, 1	3362	425	20,7	88,2	26,9	268,1	22	1481
То же, 9	3292—3272	444	40,4	104,7	14,7	277,5	16	1400
Гаурдакская, 538	421—538	418	25,0	21,0	68,7	289,9	42	1798

* Содержание I и Br дано в мг/л.

и кальция и обедненность магнием (менее 2 г/л). Распределение элементов при функциональной зависимости можно характеризовать следующими отношениями: $Cl/Na \simeq 2{,}5$; $Cl/Ca \simeq 6$; $Cl/Mg \simeq 50$; $Ca/Mg \simeq 8$ (7—10). Распределение элементов в рассолах терригенных и карбонатных отложений верхней юры подчиняется функции $y = kx$ до содержания $Cl > 55$ г/л (при меньшем значении наблюдается резкое обогащение натрием и снижение содержания кальция). Отношение Ca/Mg колеблется от 0,5 до 25, чаще 2—8. Отношение Cl/Na равно 2, $Cl/Ca = 12$.

Результаты такого анализа показывают, что по общему составу межсолевые седиментационные рассолы этих регионов практически аналогичны, но рассолы терригенных и карбонатных толщ характеризуются разными составами. Во-первых, наблюдается существенное расхождение в значениях отношения Ca/Mg: в межсолевых рассолах оно равно 2,4 (2—5), в рассолах терригенных и карбонатных толщ 8 (7—10) и 2—8 (0,5—25), что выше первого значения почти в 3 раза. Во-вторых, рассолы терригенных и карбонатных толщ Предкавказья заметно обогащены натрием и обеднены кальцием относительно соответствующих рассолов Средней Азии. Эта закономерность прослеживается также по значениям отношения Cl/Br: в рассолах терригенных и карбонатных пород Предкавказья они составляют 170—380, в соответствующих рассолах Средней Азии — от 200 до 700. Судя по этому коэффициенту, данные рассолы представляют собой или существенно растворы выщелачивания, или сконцентрированные опресненные морские воды.

Отношение Ca/Sr в рассолах юрских пород Предкавказья равно 12 (4—22), в солевых рассолах этот коэффициент колеблется от 17 до 46. В межсолевых рассолах значение отношения Ca/Br колеблется чаще от 30 до 120, в терригенных и карбонатных толщах юры Предкавказья — от 23 до 40 (7—70).

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что состав хлоридных систем межсолевых рассолов и рассолов терригенных и карбонатных толщ юрских отложений несопоставимы и представляют собой разные хлоридные системы. Однако в составе межсолевых рассолов юрского времени прослеживается та же тенденция к уменьшению значений отношений Ca/Mg и Cl/Br с возрастом, что и для рассолов палеозойских отложений (рис. 21).

Рассолы меловых и палеогеновых отложений близки по составу к рассолам терригенных и карбонатных толщ юры, поэтому мы специально не останавливаемся на их рассмотрении. Рассолы неогеновых солевых толщ Предкарпатья представлены как сульфатным, так и хлоридным типом вод ($Mg > Ca$). Состав рассолов терригенных и карбонатных толщ не соответствует составу внутрисолевых рассолов из-за значительного разброса содержаний элементов и не может быть охарактеризован функцией $y = kx$. Это, по-видимому, связано так же, как и в юрских рассолах, с заметным участием в их формировании вод выщелачивания или

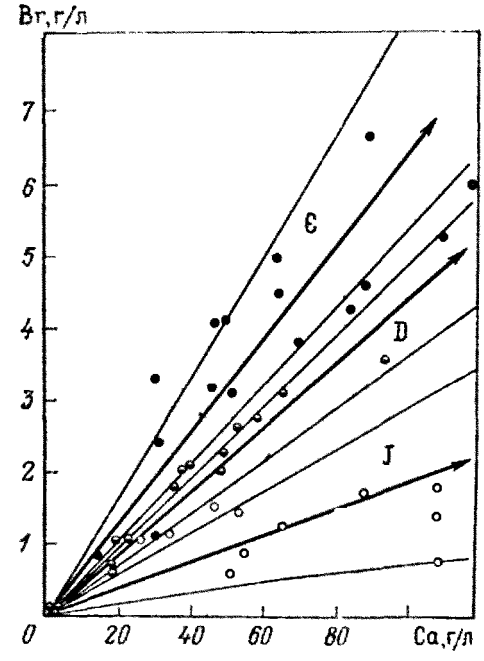


Рис. 21. График изменения концентраций брома в рассолах под-, меж- и внутрисолевых рассолов в зависимости от кальция и возраста водовмещающих толщ

опресненных морских вод, на что указывают высокие значения отношения Cl/Br.

Рассматривая рассолы неогеновых отложений СССР, можно отметить, что они характеризуются хлоридным и сульфатным составом. Причем хлоридные рассолы, даже в терригенных породах, иногда имеют содержание $Mg > Ca$.

Чтобы закончить прослеживание изменения состава рассолов в стратиграфической последовательности, исследуем некоторые данные по составу седиментационных рассолов отложений Каспийского моря.

Весьма показательными являются данные изучения поровых вод Прикаспия, выполненные Н. В. Тагеевой и М. М. Тихомировой и З. В. Пушкиной. Наиболее полные данные по закономерностям распределения элементов получены З. В. Пушкиной, которая изучала растворы четвертичных и плиоценовых отложений Южно-Каспийской впадины до глубины 1138 м. В пределах этой глубины ею выделены три зоны. Первая зона охватывает современные иловые отложения Каспия, в которой соленость и химический состав иловых вод тождественны составу и солености придонных вод Каспия (13,1 г/л). Вторая начинается с глубины 3—7 м и продолжается до глубины 875 м. Она включает поровые воды четвертичных и средне-верхнеплиоценовых отложений (апшерон, акчагыл, верхи продуктивной толщи). В этих отложениях до указанной глубины минерализация поровых вод

Сравнительная характеристика отношений элементов хлорид

Бассейн	Возраст водовмещающих пород	Ca/Mg	Cl/Na
Ангаро-Ленский	Є	7,3	2,3
Тимано-Печорский	O—S	6,2	2,3
То же	D_{2-3}	6,8	2,3
Припятский	D	5,6	2
Тимано-Печорский	D_3	4,5	2,1
То же	$C-P_1$	3,5	2,1
Современный океан		0,3	1,87

повышается от 13 до 139 г/л, причем морские воды сульфатного типа преобразуются в хлоридные. В третьей зоне в интервале 875—1200 м состав остается тот же, но происходит снижение минерализации до 58 г/л. Следует сказать, что еще в 1956 г. А. В. Щербаков отмечал неодинаковую соленость вод акчагыльского и четвертичного возраста и объяснял это неравномерностью засоленности пород и наличием пластов солей в этих отложениях мощностью до 4,5 м, обусловленных чередованием континентальных и лагунно-морских условий седиментации.

Седиментационные рассолы солей морского генезиса четвертичного возраста относятся к сульфатному типу и соответствуют составу солей (например, залив Кара-Богаз-Гол).

Таким образом, краткий анализ гидрогеохимических закономерностей показывает, что во многих гидрогеологических районах при переходе от нижних, более древних, горизонтов к верхним отмечается уменьшение содержания в рассолах хлоридов кальция, калия, брома, стронция, рубидия и возрастание содержания натрия и йода (табл. 52). Состав седиментационных рассолов одновозрастных водоносных комплексов претерпевает однотипные закономерные изменения, что свидетельствует об их едином источнике формирования. Химический состав под-, меж- и внутрисолевых рассолов обычно одинаков: парагенетически соответствует составу вмещающих солей и подчиняется определенным закономерностям. Данные радиохимических и изотопных исследований подземных рассолов различных бассейнов свидетельствуют о том, что в большинстве случаев они представляют собой захороненные морские воды, в той или иной мере разбавленные инфильтрационными водами.

ПАЛЕОГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ РАССОЛОВ

Для воссоздания истории формирования подземных вод следует учитывать исходный состав природных вод, т. е. их генетические особенности и преобразование в подземной обстановке.

Таблица 52

ной системы рассолов некоторых артезианских бассейнов

Cl Ca	Cl/Mg	Cl/K	Cl/Br	Cl/Sr	Cl/Rb
7	50	26,6	108	150	$1{,}2\cdot10^4$
7±2	30—75	20—70	156	140—390	$9—17\cdot10^3$
7±1,5	47	160	206	260	$4—12\cdot10^4$
9	50	72	208	252	$2{,}9\cdot10^4$
9	43	104	240	150—390	$3—6\cdot10^4$
12	40	115	280	150—440	$4—12\cdot10^4$
	14,9	49,8	293	$2\cdot10^3$	$9{,}6\cdot10^4$

Для решения вопросов формирования седиментационных вод артезианских бассейнов изложение ретроспективных вопросов проводится по схеме: океан→седиментационные бассейны→подземные воды.

Восстановление состава вод океана в фанерозое осуществляется разнообразными методами и, естественно, с различной степенью детальности, в зависимости от которой все методы исследования мы условно подразделяем на общегеохимические, общегеологические и палеогидрогеохимические, или палеогидрогеологические.

Результаты, полученные общегеологическими и общегеохимическими методами на основе реконструкции общей эволюции литосферы, атмосферы, гидросферы и биосферы Земли в фанерозое, отличаются общностью и гипотетичностью. Уточнение данных по составу вод проводится обычно относительно вероятного состава докембрийского и современного океанов. Результаты палеогидрогеохимических реконструкций по составу седиментационных рассолов или солей, поглощенного комплекса глинистых осадков и водных включений в породы, на основе физико-химического анализа системы вода—ионы—соль, или водные растворы — галогенные породы отличаются большей детализацией и конкретностью, чем общегеологические.

Общегеологические и общегеохимические исследования являются теоретическим базисом для палеогидрогеохимических исследований. В то же время палеогидрогеохимические исследования дополняют и детализируют общегеологические и общегеохимические данные, т. е. эти методы дополняют друг друга, обогащая наши знания о химическом составе гидросферы прошлых эпох [40].

1. Общегеологические и общегеохимические исследования по эволюции океанических вод с теоретических позиций проводились как в СССР, так и за рубежом. Для этих исследований обычно характерно рассмотрение той или иной модели развития Земли как планеты и прослеживание последующих преобразований ее сфер, включая и гидросферу. Практически все исследователи приходят к выводу о стабилизации состава вод океана к началу фанерозоя относительно состава протоокеана. Эти взгляды мы вполне разделяем относительно всей геологической истории океана. Однако с начала фанерозоя жизнь океана не кончилась, и этот период развития гидросферы, небольшой, но очень важный, имеет свою историю. Поэтому И. С. Грамберг справедливо отмечает, что вывод о постоянстве состава вод океана в фанерозое — это относительный вывод, так как процессы выветривания пород литосферы и дегазация мантии менялись во времени, в связи с чем соотношение катионов и анионов в водах гидросферы также изменялось. По-видимому, относительно стабилен в течение геологического времени был только хлор. Поэтому есть все основания считать, что при общем постоянстве состава основных компонентов океанических вод, о котором говорили В. И. Вернадский и другие, их относительное содержание с геологическим возрастом постепенно изменялось. Эти изменения носили направленный характер и являлись

отражением общей эволюции состава внешних оболочек нашей планеты.

А. Л. Яншин, рассматривая эволюцию осадочного процесса, отмечал, что за фанерозойское время, т. е. за последние 600 млн. лет, состав вод Мирового океана, по-видимому, подвергался существенным изменениям как в отношении общей величины солености, так и в отношении состава растворенных солей. Им отмечается, что точка зрения о постоянстве состава океанических вод никогда не была обоснована.

С учетом возможной эволюции океана, атмосферы и литосферы А. Б. Ронов рассчитал вероятные пропорции для щелочей и щелочных земель в водах азойского и протерозойского океана. Эти данные он сравнивал с составом современной морской воды и пришел к выводу, что вода азойского океана должна была отличаться более высокими относительными содержаниями кальция, магния и калия и более низким натрия.

Практически аналогичными содержаниями катионов характеризуются воды раннего протерозоя, где, по данным А. Б. Ронова, наметилась тенденция к инверсии катионного состава вод океана. Состав гидросферы постепенно обеднялся двухвалентными катионами и калием и насыщался натрием. При динамическом характере этот процесс растянулся на 2 млрд. лет. Максимальное относительное содержание натрия в водах океана было достигнуто, вероятно, лишь в конце палеозоя или мезозое.

А. П. Виноградов отмечает, что первичный субстрат, подвергавшийся выветриванию, был благоприятен в смысле выноса значительных масс Ca^{2+} в океан кислыми дымами (базальты). Но основной механизм выноса Ca^{2+} в виде бикарбонатов не был главным. Поэтому воды океана не были насыщены $CaCO_3$.

В одной из работ С. А. Дуров высказал предположение, что около 2 млрд. лет назад существовал чистый хлоридный океан с очень малым содержанием как бикарбонатов, так и сульфатов. Р. Гаррельс и Ф. Маккензи пишут, что можно приблизительно воспроизвести древнейшие реакции, если представить себе пустые океанические впадины, в которые сброшены огромные массы раздробленного базальтового материала, заполненные HCl и оставленные до нейтрализации раствора, и, наконец, карбонатизацию последнего пропусканием через него CO_2. HCl будет выщелачивать породы с выделением и осаждением кремнезема и образованием хлоридного океана, содержащего Na, K, Ca, Mg, Al, Fe и соединений серы, в тех же соотношениях, в которых они присутствуют в породах. Последующие реакции приводили к выделению Fe, Al, Mg из раствора, поэтому в результирующем растворе хлор балансировался бы натрием и кальцием приблизительно в равных количествах, с небольшими добавками K и Mg.

Ю. П. Казанский также отмечал, что в рифейское время преобладал преимущественно хлоридный состав гидросферы с небольшим содержанием бикарбонатов, карбонатов и сульфатов.

Таким образом, эти данные свидетельствуют, что к началу палеозоя состав океанических вод был хлоридным и преимущественно характеризовался восьмикомпонентной системой (CO_3^{2-}, HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, H_2O). Эта система обеспечивала карбонатный и сульфатный процессы осадконакопления.

Геохимический облик водосборных провинций и экспериментальные данные по выщелачиванию пород при латеритообразовании позволяют говорить, что в рифее величина отношения Ca/Mg в речном и подземном стоках могла изменяться от 9 до 22. С учетом эволюции осадочного процесса и состава атмосферы эта величина в океане, вероятно, уменьшалась на протяжении всего фанерозоя. Интенсивность миграции элементов на водосборных площадях менялось от K>Ca>Na>Mg и Ca>K>Mg>Na в верхнем протерозое до Na>Mg>K>Ca в фанерозое.

В данной работе мы не будем подробно касаться процессов карбонатного равновесия, обеспечивающего возможность сохранения значительного количества кальция в океане. По данным О. А. Алекина, процесс выделения карбонатов кальция весьма сложен и зависит от целого ряда факторов, которые трудно учесть даже для современного океана. В 1963 г. Н. М. Страхов отмечает, что при высоком давлении CO_2 атмосферы и в условиях большого осолонения интенсивная химическая садка доломита из воды практически полностью подавляет садку кальцита. Н. М. Страхов и А. Б. Ронов находят, что докембрий и палеозой являются эпохами доломитообразования, т. е. магний выводится из раствора более интенсивно, чем кальций. В докембрии доломиты осаждались в морях гумидного и аридного климата, в палеозое — только в аридном. По А. П. Казанскому, доломитообразование закончилось в пермо-юрском периоде. В настоящее время М. И. Будыко, А. Б. Ронов и А. Л. Яншин установили, что повышенное содержание CO_2 наблюдалось до конца мезозоя. На протяжении фанерозоя масса CO_2 была больше современной в 10—15 раз. В начале фанерозоя количество кислорода составляло всего около 30 % от его современной массы. С уменьшением повышенного давления CO_2 заканчивается эпоха доломитообразования и выведения магния из вод океана в процессе карбонатонакопления.

Р. В. Фэрбридж, отмечая трудности в реконструкции поведения карбонатной системы прошлого, указывает, что высокие содержания кальция в начале фанерозоя, обнаруженные в водных включениях кремнистых пород и солей, могут объясняться повышенным давлением CO_2. Процесс изменения содержания катионов в хлоридных водах намечается и по составу пород.

А. П. Виноградов, А. Б. Ронов и В. М. Ратынский установили, что от протерозоя до палеогена значение отношения Ca/Mg в карбонатных породах изменяется от 0,5 до 4 и носит направленный характер. То же самое наблюдается в глинах Русской и Северо-Американской платформ. Содержание калия в глинах Русской платформы уменьшается от 4 % в кембрии до 1,5—2 % в мел-палеогене, а концентрация натрия возрастает почти в 2 раза.

По анализу состава глауконитов Г. А. Казаков находит, что содержания калия и аммония уменьшаются, а натрия возрастают от рифея до настоящего времени. Все эти данные показывают, что процесс изменения состава вод океана в фанерозое был направленным, уменьшалось содержание кальция и калия и увеличивалось содержание натрия. Величина отношения Ca/Mg уменьшалась от протерозоя до палеоген-неогена или четвертичного времени.

Учитывая направленность нашей работы, попытаемся с общегеохимических и палеогидрогеохимических позиций уточнить поведение ценных элементов (Br, I, Sr, B, Li, Rb, Cs) в океане в течение фанерозоя. Учитывая, что кальций и стронций, калий, литий и рубидий близки по своим физико-химическим свойствам, можно ориентировочно определить их поведение в водах океана фанерозоя. В составе вод гидросферы концентрации стронция, литня и рубидия от кембрия к четвертичному периоду должны уменьшаться. Это подтверждается и учетом приходного (гидротермы и выщелачивания магматических пород в докембрии при высоких давлениях CO_2) и расходного (сорбция и галогенез) балансов. О поведении B и Sr можно судить по эволюции их в глинистых веществах. Так, Е. П. Акульшина, прослеживая эволюцию глинистого вещества от рифея до мезозоя, отмечает, что содержание бора в глинистом веществе увеличивается от рифея до ордовика и понижается от силура до перми. Содержание стронция нарастает к ордовику, достигая максимума, затем уменьшается в силуре и девоне и снова увеличивается в мезозое.

А. П. Виноградов отмечает, что имеющееся в океане количество брома и хлора может быть объяснено только процессом дегазации мантии. Однако их соотношение могло изменяться в фанерозое в результате усиления процессов сорбции, галогенеза и поглощения органическим веществом брома.

Определить поведение йода в водах океана весьма затруднительно, так как этот элемент участвует в окислительно-восстановительных реакциях и является хорошим водным и воздушным мигрантом. Можно лишь предполагать, что основная его масса в докембрии была сосредоточена в атмосфере и гидросфере. В дальнейшем, с появлением мощной биосферы, в результате захоронения в осадочные породы с органическим веществом и тонкими фракциями терригенных отложений его баланс был отрицательным. Баланс йода между атмосферой и гидросферой в фанерозое зависел от многих факторов. Например, ультрафиолетовое излучение и присутствие трехвалентного железа в водах океана докембрия может перевести йод из ионной формы в свободное состояние. И только потом, с эволюцией литосферы, атмосферы и биосферы йод мог накапливаться в ионной форме в водах океана.

Таким образом, с общегеологических и общегеохимических позиций следует, что ионный состав вод океана фанерозоя характеризовался системой Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-}, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}. В анионном составе преобладал хлор, содержание сульфатов, гидрокарбонатов и карбонатов было значительно меньше. Содержание

натрия и йода возрастало, а калия, кальция, магния, брома, стронция, лития и рубидия уменьшалось от кембрия до конца мезозоя или, возможно, настоящего времени. Отношение Ca/Mg в этот период, вероятно, также уменьшалось. Этот процесс был направленным и определялся всем ходом эволюции оболочек планеты.

2. Палеогидрогеохимические исследования по реконструкции состава вод океана по анализу состава солей, рассолов, поглощенного комплекса глин и водных включений в породах проводились давно. Например, делались попытки реконструировать состав вод седиментационных бассейнов только по солям или только по рассолам. С физико-химических позиций это можно интерпретировать как восстановление облика системы по одной из своих фаз, что, естественно, детально сделать нельзя. Однако эти исследования показали возможность таких реконструкций и, кроме того, были получены интересные результаты.

По анализу состава седиментационных подземных рассолов в 1908 г. была проведена А. С. Лейном одна из первых реконструкций состава древнего океана. Он отмечал, что в начале фанерозоя состав вод океана был богаче кальцием и беднее натрием. В последующих своих работах он установил изменение отношения натрия к хлору. Е. В. Посохов, объясняя происхождение подземных рассолов, доказывает возможность существования океана с хлоридным типом вод в палеозое [40]. Я. В. Самойлов, исходя из характера отлагавшихся солей, пришел к выводу об обедненности вод цехштейнового моря магнием, калием и сульфатами. Г. Г. Уразов, А. Е. Рыковсков, Ю. В. Морчевский образование хлоридных калийных солей Соликамского месторождения связывали с хлоридными растворами солеродного бассейна. Ю. Ф. Кореннов, рассматривая распределение солей в палеозое, приходит к выводу, что до пермского времени состав вод океана был хлоридный. Н. М. Джинориадзе и В. Е. Раевский более определенно заключают, что в фанерозое хлоридные калийно-магниевые толщи отмечались до неогена, за исключением пермо-триасового времени. Этим солям соответствует хлоридный тип солеродных бассейнов. Однако авторы не проводили палеогеографического анализа, поэтому ими не были детализированы изменения в пространстве состава солей пермо-триасового времени.

Но следует отметить, что пермские эвапориты отличаются от сульфатов современного океана и эвапоритов другого возраста пониженным содержанием ^{34}S. Г. Тод и Д. Монстер объясняют различие в значениях изотопа ^{34}S тем, что изотопный состав сульфатов в разных внутренних морях претерпевал значительные изменения, в океане же содержание изотопов оставалось довольно постоянным. Если учесть, что от кембрия до четвертичного периода содержание изотопа ^{34}S в эвапоритах постепенно снижается от 28% до 20 %, а в пермское время составляло лишь 9,6—13 %, то следует предположить, что в пермское время происходил усиленный привнос легких изотопов с континента, т. е. обогащение поверхностной гидросферы сульфатами.

При палеогеографическом анализе размещения калийно-магниевых солей пермского времени было отмечено, что хлоридные соли тяготеют ближе к области океанического питания, а сульфатные и хлоридные — к внутренним частям континентальных бассейнов. Вполне естественно, что усиленный привнос сульфатов с континента вызывал смещение равновесия в составе морских вод до неравенства $SO_4^{2-} > Ca^{2+} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^-$, т. е. постепенного перехода от хлоридного в сульфатный тип. Поэтому, проведя физико-химические анализы систем раствор — галогенные породы, мы пришли к выводу, что состав океанических вод до неогена был хлоридным, а отношение Ca/Mg уменьшилось.

В связи с возрастанием количества кислорода в фанерозое сульфатообразование является одним из ведущих процессов, приводящих к уменьшению содержания кальция в океане. Этот процесс наиболее интенсивно мог протекать во внутриконтинентальных морях в связи с дополнительным привносом сульфатов с континента.

М. А. Жарков, Т. М. Жаркова и Г. А. Мерзляков, рассматривая особенности галогенеза в связи с проблемой эволюции солевого состава вод Мирового океана в палеозое и приводя весьма интересные данные о количественном соотношении пород, приходят к выводу о наличии иного состава океанических вод в палеозое, но специальных исследований не проводят. Отмечая широкое развитие сульфатнокальциевых пород, они предполагают, что океан был обогащен кальцием или сульфатами.

По анализу микровключений в солях О. И. Петриченко пришел к выводу о направленном изменении состава рапы в древних солеродных бассейнах в фанерозое. На Международном геологическом конгрессе в Москве (1984 г.) В. М. Коваленко, используя данные О. И. Петриченко, сделал доклад об эволюции солевого состава древнего океана. По их данным, в силуре, перми и неогене океан был сульфатным и формировались сульфатные и хлоридно-сульфатные калийные соли, в остальные периоды фанерозоя — хлоридным. Однако для силура и перми они не учли палеогеографические особенности солеродных бассейнов. В 1983 г. Г. А. Московский по анализу микровключений в солях Прикаспийской впадины отметил наличие как сульфатных толщ с сульфатными включениями, так и хлоридных — с хлоридными включениями.

В. С. Шайдецкая, рассматривая физико-химические условия образования девонской каменной соли в Днепровско-Донецкой и Припятской впадинах с использованием этого метода, восстановила химический состав позднедевонского солеродного бассейна. По ее данным, он характеризовался хлоридным типом растворов с отношением Ca/Mg больше 3. Реконструкции по поглощенному комплексу впервые были предприняты А. Н. Бунеевым. По его данным, древние моря до неогена имели хлор-кальциевый (хлоридный) состав вод.

Начиная с 1959 г. ВНИИГа проводились исследования по изучению поглощенного комплекса глинистых пород и реконструкции

Таблица 53

Данные реконструкции состава морской воды. По Н. С. Спиро

Возраст	Число анализов	Средний состав поглощенных катионов, %				Реконструированный состав морской воды, %		
		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^+	K^+	$Ca^{2+}+Mg^{2+}$
O	19	30,2	15,6	41,2	13,1	82,1	3,2	14,7
K	299	27,3	5,5	22,8	44,4	60,7	0,9	38,4
J	213	30,0	6,9	24,0	39,1	69,7	1,1	29,2
T	215	35,4	7,9	23,3	33,4	80,8	1,3	17,9
P	484	25,9	13,5	22,4	38,2	72,7	3,0	24,3
C	76	15,23	10,87	—	73,9	42,6	2,7	54,7
Є	40	10,77	7,7	—	81,53	26,1	1,8	72,1

состава вод древних морей. Н. С. Спиро пришел к выводу, что в течение фанерозоя состав арктических морей обедиялся щелочноземельными элементами и обогащался натрием (табл. 53). Довольно хорошо на определенных отрезках времени прослеживается уменьшение калия, однако поведение его более сложное. Содержание магния в поглощенном комплексе становится больше кальция лишь между меловым и четвертичным периодом.

Реконструкционные построения по анализу состава включений в породах проведены Ю. П. Казанским. По его данным, состав морской воды рифейско-нижнекембрийского времени был таков: 1) катионы — Ca^{2+} (Mg^{2+}, Na^+, K^+, Li^+, NH_4^+); 2) анионы — $Cl^- > F^- > HCO_3^-$ и CO_3^{2-}.

Далее он на значительном региональном материале построил график, на котором для нижнего палеозоя четко выражено отношение: $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$.

В последнее время мезо-кайнозой рассматривается как важный рубеж в истории развития океана, так как в это время, начиная с юры, наблюдается усиленная океанизация планеты. Необходимо отметить, что результаты обширных исследований иловых вод пелагических областей океана как верхней толщи осадков, так и глубинных слоев осадков, показывают, что в пелагических осадках разных типов — красных глинах и биогенных осадках (кремнистых и известковых), бедных органическим веществом и с низкими скоростями седиментации, основной солевой состав иловых вод в течение последних 100—150 млн. лет сохраняется близким к составу современного океана. Считается, что постоянство состава иловой воды в пелагических осадках океана в течение длительного геологического времени вполне закономерно, так что воды, захваченные осадком в процессе седиментации, наследуют состав вод бассейна. На дно осадки поступают в состоянии равновесия с океанической водой, и в них отсутствует источник энергии, способствующий развитию окислительно-восстановительных процессов. Данные анализов состава иловых вод приведены в табл. 54.

Таблица 54

Основной состав иловых вод (ммоль/кг) в пелагических осадках разного возраста по данным глубоководного бурения (по исследованиям с борта судна «Гломар Челленджер»)

Глубина от дна, м	Осадки	Возраст	Анионы				Катионы				
			Cl	SO_4	CO_3+HCO_3	Σ	Na	K	Ca	Mg	Σ
			Тихий океан, глубина 5059 м								
17	Радиоляриевый ил	Средний миоцен	551	53,5	3,6	608	474	11,2	23,0	101,0	609
221	Мел	Средний олигоцен	552	46,0	2,2	600	465	6,6	58,4	70,7	601
329	Радиоляриевый ил	Поздний эоцен	548	47,9	1,9	598	456	4,8	77,0	58,4	596
			Тихий океан, глубина 4419 м								
30	Известково-кремнистый ил	Поздний миоцен	553	54,6	2,3	610	474	10,5	21,5	103,0	609
430	Мел	Поздний олигоцен	556	42,9	1,9	600	474	8,7	55,8	58,4	597
			Атлантический океан, глубина 5361 м								
58	Алевролитовые глины		547	53,5	2,6	603	452	10,0	28,4	102	592
	Мергель	Сеноман	567	38,5	1,1	607	413	4,9	125	62,5	605
	»	Поздний альб	577	40,0	0,5	618	400	3,6	160	55,9	620
			Индийский океан, глубина 3020 м								
7	Форамини-ферово-глинистый ил	Плейстоцен	544	54,8	—	599	469	12,5	20,6	100	602
397	То же	Палеоцен	584	30,8	—	615	391	7,6	134,7	84,7	618
502	Глинисто-форамини-феровый ил	Маастрихт	620	28,5	—	648	352	7,2	225	67,7	651

Из табл. 54 видно, что иловые воды четвертичного и неогенового времени характеризуются сульфатным типом вод. Воды палеогеновых и меловых отложений отличаются хлоридным типом растворов, при малом изменении сульфатов. В хлоридной системе до меловых отложений содержание кальция больше магния, в палеогеновых осадках это равновесие смещается в сторону преобладания магния над кальцием.

Это показывает, с одной стороны, относительность мнения о постоянстве океанических вод, с другой — подтверждает выводы палеогидрогеохимических реконструкций по анализу состава поглощенного комплекса и состава ископаемых солей и рассолов.

Подводя итоги, следует отметить, что в течение фанерозоя состав океанических вод характеризовался следующей системой: $Na^+ + K^+$, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-}, в которой до неогена соблюдалось неравенство $Ca^{2+} > SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + 2HCO_3^-$, а с неогена $SO_4^{2-} > Ca^{2+} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^-$.

В водах внутриконтинентальных морей этот процесс мог значительно ускоряться в результате более интенсивного выведения кальция из раствора и привноса сульфатов с континента. С течением времени направленные изменения сопровождались уменьшением кальция, магния и калия и возрастанием натрия. Физико-химический анализ состава галогенных пород и седиментационных рассолов показывает уменьшение содержания брома, стронция, лития, рубидия от кембрия к современному периоду. В этот же период отношение Ca/Mg в водах океана изменяется от 10 до 0,4. Содержание йода в водах океана нижнего палеозоя было незначительно, но выше, чем в современном океане. В начале верхнего палеозоя его содержание в гидросфере резко возрастает, затем до конца мезозоя постепенно уменьшается, а после мезозоя до настоящего времени наблюдается весьма сильное его сокращение. Все это подтверждается и результатами общегеологических и общегеохимических реконструкций.

Дальнейшая детализация состава седиментационных вод палеобассейнов СССР возможна на основе физико-химического анализа указанных систем.

Реконструкторный анализ состава вод седиментационных бассейнов прошлого методом физико-химического анализа системы раствор—галогенные породы основан на возможности нахождения точной ассоциации (парагенезиса) системы раствор—соль в квадрате Иенеке или треугольнике Розебума с последующим графическим прослеживанием поведения всех элементов (как составляющих систему, так и микрокомпонентов) относительно тех, которые стабильны в системе, и нахождения соответствующих концентраций исходного раствора. Этот метод разработан С. С. Бондаренко и В. М. Поповым в 1979 г. и использовался как для валовой обработки данных химических анализов по седиментационным рассолам и солям, так и для реконструкции вод палеобассейнов прошлого. При реконструкции этим методом, естественно, не может быть учтено количество малорастворимых солей.

Выбор этого довольно простого метода для реконструкции исходного состава палеобассейнов обусловлен относительно полными знаниями о поведении хлоридной и сульфатной системы и характерных для каждой из них солевой и жидкой фаз. Положительными сторонами этого метода являются: 1) наличие относительно стерильных конечных фаз этих систем по отношению друг другу. Например, высококонцентрированный хлоридный кальциевый рассол в галите. В данном случае ни рассол, ни соль не могут значительно обогащаться один за счет другого; 2) свойство системы соль—раствор при концентрировании к самоизоляции в результате возрастания объема твердой фазы, что затрудняет химический обмен системы с окружающей средой; 3) возможность графического прослеживания изменения состава твердой и жидкой фаз; 4) свойство системы возвращаться в менее концентрированное состояние при последовательном растворении в воде всех соответствующих фаз (твердой и жидкой). При растворении одной какой-либо фазы образуются характерные растворы, обладающие специфическим химическим обликом растворенной фазы (например, растворы выщелачивания каменной соли).

Так как реконструкции касаются геологической среды прошлого, то при необходимости мы использовали данные палеогеологии и палеогеографии. Как следует из эмпирических закономерностей по седиментационным рассолам и солям, в практике работ приходится сталкиваться преимущественно с двумя системами: хлоридной и сульфатной. Известно, что правило фаз для системы, находящейся в химическом равновесии, имеет вид $F=C+2-P$, где P — максимальное число фаз, C — наименьшее число независимых химических компонентов, посредством которых можно отобразить состав присутствующих фаз; F — вариантность системы (число степеней свободы без изменения присутствия фаз).

Хлоридная система рассматривается как четырехкомпонентная водная система: Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, Cl^{-}. Сульфатная — также четырехкомпонентна: Na^{+}, Mg^{2+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}. Первая может быть изображена треугольником Розебума, вторая — квадратом Иенеке.

Экспериментальные данные по поведению хлоридной и сульфатной систем, изложенные выше, свидетельствуют, что при их концентрировании выделяются характерные для каждой из них твердая и жидкая фазы. Так, при концентрировании сульфатного типа вод в твердую фазу выделяются карбонаты, гипс, сульфаты магния (астраханит — $Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$; эпсомит — $MgSO_4 \times 7H_2O$; кизерит — $MgSO_4 \cdot H_2O$; каинит — $KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$ и др.), сильвинит, карналлит, бишофит; из хлоридного типа вод выпадают карбонаты, гипс, галит, сильвинит, карналлит, бишофит, тахогидрит и шестиводная соль хлорида кальция. Причем в хлоридной системе две последние соли выпадают при содержании кальция больше магния, выделение бишофита наблюдается в большей степени с обратным отношением этих элементов. Жидкие фазы сульфатной и хлоридной систем особенно отличаются по содержаниям кальция и стронция. Эти различия наблюдаются также по объему

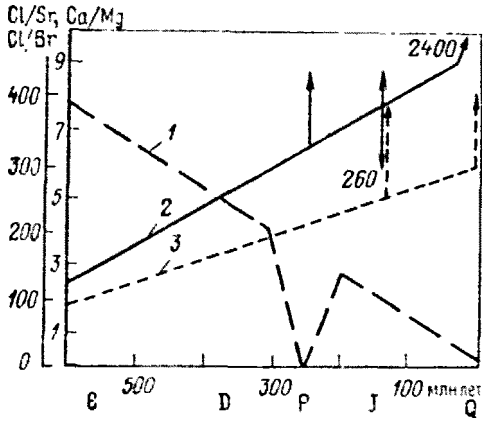


Рис. 22. Изменение отношений Ca/Mg (*1*), Cl/Sr (*2*), Cl/Br (*3*) в хлоридной системе гидросферы фанерозоя

фаз и микропримесям. Поэтому по составу фаз системы легко можно восстановить исходный ее состав. Однако более детальные реконструкции проводятся графическим методом по составу растворов с использованием функциональной зависимости $y=kx$ и неполной функции $y=kx-b$.

Анализируя распространение одновозрастных галогенных формаций СССР и сопутствующих им солевых рассолов, мы установили их четкую парагенетическую связь, т. е. соответствие одноименным концентрированным системам. Эта связь хорошо прослеживается в треугольнике Розебума и квадрате Иенеке (см. рис. 17). Иначе говоря, в гидрогеохимическом отношении мы имеем определенные возрастные ассоциации солей и рассолов, причем распределение элементов в жидкой фазе подчиняется концентрированному характеру и может быть охарактеризовано функцией $y=kx$ и неполной функцией $y=kx-b$. Используя эти функциональные связи, мы реконструировали исходный состав вод седиментационных бассейнов кембрийского, девонского, пермского, юрского и неогенового времени относительно хлора. Эти данные условно сравнивались с составом вод современного океана и одного из внутриконтинентальных солеродных бассейнов (Кара-Богаз-Гол).

В седиментационных бассейнах СССР на протяжении всего фанерозоя происходили направленные изменения химического состава вод: возрастало содержание натрия и уменьшалось содержание кальция, калия, брома, стронция, лития, рубидия, цезия и ряда рудных элементов (цинк, свинец, медь и др.). В составе вод солеродных бассейнов содержание магния возрастало, значение отношения Ca/Mg уменьшалось. Эти тенденции хорошо прослеживаются графически. Отношение Ca/Mg в водах седиментационных бассейнов уменьшается от кембрия к четвертичному периоду (рис. 22). Интенсивность уменьшения этого коэффициента составляет 1,33/100 млн. лет. В водах солеродного бассейна пермского времени эти отношения в зависимости от удаленности от области океанического питания и интенсивности выведения кальция из раствора снижаются до нуля. Однако в юрское время его среднее значение выходит на общий уровень с небольшими отклонениями. Судя по общей тенденции уменьшения этого коэффициента, около 80—100 млн. лет назад концентрация кальция стала меньше, чем концентрация магния.

Такая четкая зависимость изменения отношения Ca/Mg во времени в солеродных бассейнах СССР связана с общей эволюцией

состава вод океана, где, как было показано раньше, также наблюдается эта тенденция. На генетическую связь океанических, морских и седиментационных растворов указывают изотопные данные по составу кислорода и водорода. Известно, что в генетическом отношении катионный состав вод океана и внутриконтинентальных морей определялся преимущественно составом растворов выщелачивания пород водосборных площадей и процессами, происходящими в гидросфере. Эти процессы менялись во времени. Так, катионный состав вод океана докембрия и начала кембрия практически полностью определялся составом растворов, образующихся при углекислотном выщелачивании силикатных пород при повышенных давлении и температуре. Образующиеся при этом растворы могли иметь кислый состав, напоминающий современные гидротермы, и отличаться высокими значениями отношений Ca/Mg. Для Восточной Сибири на генетическую связь содержаний кальция и стронция с силикатными породами указывают изотопные исследования. В 1980 г. В. С. Лепин, анализируя отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ в седиментационных рассолах этого региона, констатирует, что во всех случаях стронций, а значит, и кальций поступали в рассольные воды преимущественно из силикатных пород.

Затрагивая вопрос возможного изменения седиментационных рассолов при захоронении и в подземной обстановке, он отмечает, что реакция доломитизации не являлась основным процессом накопления кальция и стронция в исследуемых рассолах. Это следует и из анализа гидрогеохимических данных: в пределах развития одновозрастных галогенных толщ во всех породах (солях, карбонатах, песчаниках) распространены однотипные рассолы, с одинаковыми значениями отношения Ca/Mg. Для практических целей наиболее важно знание поведения микроэлементов в составе вод седиментационных бассейнов. На протяжении всего фанерозоя содержание стронция в водах седиментационных бассейнов уменьшалось (см. рис. 22). Наиболее резкие уменьшения этого элемента наступают после юрско-неогенового времени. В пермском солеродном бассейне уменьшения стронция наблюдаются во внутренних зонах бассейнов, особенно с переходом в сульфатный тип вод. От кембрия до юры интенсивность возрастания составляет около 55/100 млн. лет. В начале кембрия это отношение было равно 125. Содержание брома в водах солеродных бассейнов на протяжении всего фанерозоя также уменьшалось (см. рис. 22). Интенсивность возрастания Cl/Br составляла приблизительно 35/100 млн. лет. В начале кембрия это отношение было около 90. Известно, что воды внутриконтинентальных морей в зависимости от изоляции и гидрографических условий наиболее интенсивно обедняются бромом по сравнению с океаническими водами. Примером этому служат Каспийское море и солеродный бассейн залива Кара-Богаз-Гол, где отношение Cl/Br в исходных растворах почти в два раза больше, чем в океанических водах. Аналогичное явление наблюдалось в определенные периоды в солеродном бассейне юрского и неогенового времени.

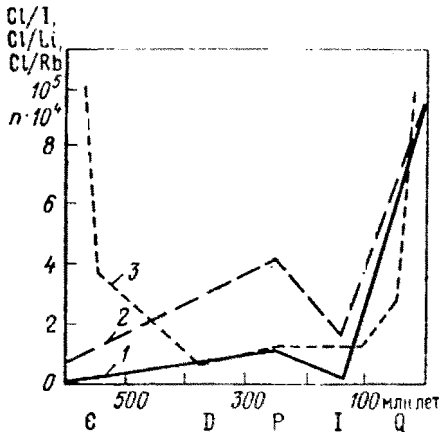


Рис. 23. Изменение отношений Cl/Li (1), Cl/Rb (2) Cl/I (3) в хлоридной системе гидросферы фанерозоя

Содержание лития и рубидия уменьшалось также до четвертичного времени (рис. 23). Интенсивность возрастания Cl/Li составляла от кембрия до перми ~3000/100 млн. лет, в юрское время она уменьшалась (Cl/Li = =2000), а затем возрастала до 63 000/100 млн. лет. В начале кембрия значение отношения Cl/Li составляло примерно 1500. Интенсивность возрастания Cl/Rb в палеозое составляет около 10 000/100 млн. лет; в начале палеозоя — 7000. В юрское время наблюдается вновь возрастание содержания рубидия до 15 000; затем оно интенсивно уменьшалось. Характерно, что возрастающие содержания редких щелочных элементов в юрское время хорошо увязываются с особенностями процессов выветривания на континентах в пермо-триасовое время и началом океанизации планеты. Это касается и ряда других элементов.

Наиболее сложно и менее достоверно удается реконструировать содержание йода этим методом из-за многообразия его форм миграции. Однако на фоне разброса точек в выборах одновозрастных рассолов находятся такие, которые располагаются на прямой линии графика зависимости йода от кальция, магния, брома, стронция и лития (функция $y = kx$). Известно, что йод в процессе концентрирования рассолов накапливается одновременно с названными элементами. Именно эти точки мы посчитали основными для реконструкции его состава в исходных растворах.

В начале кембрия содержание йода в солеродных бассейнах мало, но больше, чем в современном океане (см. рис. 23). Отношение в кембрийском бассейне колеблется от $3{,}8 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^5$. Затем к девону это значение уменьшается до 6000 и сохраняется приблизительно до юрско-неогенового времени, после чего наблюдается его резкое уменьшение. Интересно, что возрастание йода в гидросфере девона коррелируется с началом более интенсивного продуцирования органического вещества на суше.

Следует отметить, что в кембрийских рассолах концентрированный характер имеют такие компоненты, как бор, цезий, кремний ($SiO_2 > 1200$ мг/л), марганец (>300 мг/л), железо (>1500 мг/л), цинк (>200 мг/л), свинец (>84 мг/л), медь (>29 мг/л), серебро (до 6 мг/л) и др. В девонских рассолах также отмечены высокие концентрации этих элементов, но меньше, чем в кембрийских. Мы не ставили своей задачей реконструкцию их относительного состава в водах палеобассейнов прошлого. Однако обращаем внимание, во-первых, на высокую металлоносность вод седиментационных бассейнов СССР прошлого, которая

от кембрия уменьшалась, во-вторых, в хлоридной системе многие металлы концентрировались в седиментационных рассолах и захоронялись в эвапоритовых толщах.

Высокая металлоносность морских вод и седиментационных рассолов прошлого объясняется особенностью осадочного процесса, и в частности рудообразования. Так, в 1968 г. В. М. Попов установил, что в осадочных породах отмечаются свинцово-цинковая и флюорит-баритовая минерализации. Флюорит и барит часто ассоциируются с целестином и имеют региональное распространение в карбонатных породах Русской и Сибирской платформ. Следует отметить, что благоприятные условия для отложения флюорита и барита часто создавались в условиях начального галогенеза.

Таким образом, состав седиментационных рассолов СССР в течение фанерозоя менялся направленно: уменьшалось содержание кальция, калия, стронция, лития, рубидия, брома и ряда рудных компонентов; содержание магния и натрия возрастало. Содержание йода в кембрии и неоген-четвертичном периоде было минимальным, в остальное время — значительно выше. Все эти изменения состава седиментационных вод СССР являются частным случаем в эволюции состава океанических вод фанерозоя.

Поверхностные воды и рассолы в процессе седиментации захоронялись преимущественно в галогенные, сульфатные, карбонатные или терригенные отложения, образуя различные гетерогенные системы: вода—ионы—порода—газ—органическое вещество. Последующее преобразование этих систем происходило уже в условиях диагенеза и катагенеза.

Увязывая процессы изменения состава систем с палеогеографическими, литологическими, термодинамическими, гидрогеологическими и другими палеоданными, можно достаточно подробно дать модели формирования подземных вод любого артезианского бассейна.

Для понимания процессов изменения растворов в подземной обстановке весьма важно знать поведение системы раствор—порода при изменении термодинамических условий.

Мы обращаем особое внимание на то, что в связи с эволюцией планеты в фанерозое состав гомогенных и гетерогенных водных систем претерпевал необратимые изменения, что являлось частью единого процесса эволюции поверхностных оболочек Земли. Поэтому, рассматривая преобразования в подземной обстановке двух групп систем раствор—соли и раствор—терригенные породы, следует учитывать, что в течение фанерозоя в первой группе системы наблюдалось: 1) закономерное возрастание в составе карбонатных пород значений отношения Ca/Mg и снижение количества хемогенных карбонатов и, в частности, доломитов; 2) широкое развитие среди карбонатов в палеозое отложений барита, целестина, флюорита и стратиформных рудных месторождений; 3) выделение вместо гипса в составе сульфатов кальция, отлагавшихся в древних морях, ангидритов; 4) выпадение значительно большего коли-

чества галита по отношению к калийно-магниевым солям в палеозое, чем в современных солеродных бассейнах морского типа. Количество примесей $CaCl_2$ в галите во времени уменьшалось; 5) отложение от кембрия до неогена, за исключением пермского времени, хлоридных калий-магниевых солей, с неогена — сульфатных калийных солей. В хлоридных калийных солях наблюдалось закономерное уменьшение количества тахогидрита и сильвинита и возрастание содержаний карналлита во времени. В пермское время ближе к области питания солеродных бассейнов выделялись хлоридные калийные соли, а во внутренних зонах — хлоридные и сульфатные; 6) изменение от кембрия до четвертичного периода состава растворов от хлоридного к сульфатному с относительным уменьшением кальция, стронция, брома, лития, рубидия, цезия, йода и ряда рудных элементов и возрастанием содержания магния и натрия.

Во второй группе гетерогенных систем наблюдалось закономерное изменение состава глинистого вещества. Е. П. Акульшина отмечает, что от рифея до мезозоя в составе глинистой части осадочных пород заметно уменьшалось содержание гидрослюды. Этот интервал делится на три этапа. 1. Рифейско-вендский. Характеризуется преобладанием гидрослюды, на некоторых стратиграфических уровнях присутствует значительное количество каолинита, хлорит является второстепенным минералом. 2. Нижне-среднепалеозойский. Гидрюослюда остается главным компонентом в области аридного климата, хлорит составляет значительную, иногда большую часть глинистой фракции, усиливается роль смешаннослоистых минералов. 3. Верхнепалеозойский—мезозойский. Отличается значительным снижением содержания гидрослюды и увеличением доли смешаннослоистых минералов, монтмориллонита, вермикулита.

В связи с изменением состава атмосферы (уменьшение CO_2, возрастание O_2) состав инфильтрационных вод и многие физико-химические процессы в поверхностных условиях также менялись направленно. Поэтому, на наш взгляд, большинство реконструкций на основе идеи постоянства физико-химических процессов в фанерозое методологически некорректны.

Системы раствор—порода начинают, как правило, формироваться в водной среде, и последующие изменения претерпевают на стадиях диагенеза и катагенеза при растущем влиянии температуры и давления. Выше было отмечено, что геотермический градиент, а вместе с тем и температура, зависят от положения разреза в геологических структурах. Для ориентировочных оценок изменения температурных условий, в которых оказываются системы, мы учитывали рост температуры с глубиной, рассчитанной по среднему значению геотермического градиента:

100 м	3 °С	4000 м	120 °С
1000	30	5000	150
2000	60	6000	180
3000	90	7000	210

Ориентировочные оценки роста давления (с учетом только лишь давления нагрузки) с глубиной можно провести по изменению средней объемной массы пород (Н. В. Логвиненко):

100 м	1,5 МПа	4 000 м	98,0 МПа
500	8,5	5 000	126,0
1000	20,0	7 000	183,0
2000	42,0	10 000	270,0
3000	69,0		

Система раствор—соль. Формирование этой системы начинается с возрастающей соленостью вод морских бассейнов. Независимо от типа вод (хлоридный или сульфатный) при концентрировании системы $K^+ + Na^+$, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-}, H_2O в осадок выделяются прежде всего карбонаты и сульфаты кальция, а затем галит и калийные соли. По этой схеме происходило отложение солей во всех эвапоритовых бассейнах фанерозоя. В процессе галогенеза образовывались растворы, находящиеся в физико-химическом равновесии с солями как фазами одной и той же системы. В связи с определенной последовательностью выпадения солей в эвапоритовых бассейнах имело место закономерное распределение первичных эвапоритовых фаций как в пространстве, так и во времени. Карбонаты и сульфаты кальция наблюдались обычно у краев бассейнов и образовывали нижние слои в пределах конкретной эвапоритовой толщи. Хлориды — в центральных, более опущенных участках, и слагали верхние толщи. Наиболее погруженные части заполнялись калийными фациями. Процесс рассоления бассейна фиксировался обратным порядком залегания пород. Поэтому типичный разрез (например, для палеозойских соленосных отложений) имеет следующую ритмичность: карбонаты (известняки, доломиты, мергели), ангидриты, галит, калийная зона, галит, ангидрит, карбонаты. В ряде бассейнов первичное распределение осадков нарушалось в результате растворения и частичного замещения солей в периоды воздействия субаэральных процессов в промежутках между поступлением морских вод. Однако эти процессы не могли существенно нарушать общей закономерности в составе солей и рассолов в связи с локальностью их распределения.

Как уже отмечалось, хлоридная и сульфатные системы при концентрировании изолируют себя выпадающим галитом. В природной обстановке надежность этой изоляции дополнялась сульфатами, карбонатами и глинами, а также процессами уплотнения пород и уменьшения пористости. Это же касается изоляции захороняемых подземных рассолов. А. Е. Ходьков, анализируя возможность разрушения соляных залежей, отмечает, что соляные пласты обычно являются частью свиты своеобразных пород, характерных для соляных бассейнов. Они, как правило, чередуются с глинисто-ангидритовыми породами и обычно со всех сторон окружены ими. При ненарушенности этой естественной упаковки соляные породы весьма устойчивы длительное геологическое время. Таким образом, предпосылками для изоляции и сохранения подземных

рассолов в галогенных породах были особенности их захоронения в бассейнах седиментации. Изоляции систем растворы — карбонатные породы, растворы — сульфатные породы способствуют также вторичные процессы. Так, например, при внедрении инфильтрационных вод карбонатного состава в систему хлоридный раствор — порода наблюдались выпадение карбонатов кальция и запечатывание системы выпадающими солями.

В подземной обстановке рассматриваемые системы подвергались воздействию механических, физико-химических и биологических сил. Действие последних, по данным Л. Е. Крамаренко, определялось степенью концентрирования растворов, и в растворах высокой концентрации (>300 г/л) эти силы практически не проявлялись.

Из механических сил наиболее существенными оказывались гравитационные силы, под воздействием которых с момента седиментации начиналось перераспределение растворов по удельному весу. Растворы галогенных пород, имеющие структуру соли, вели себя, как несмешивающиеся жидкости, и наиболее тяжелые из них занимали пониженные участки в системе, выдавливая облегченные растворы. Этот процесс затрагивал всю толщу осадков и пород, а перемещение тяжелых и легких рассолов происходило не только в вертикальном плане, но и в горизонтальном.

С увеличением нагрузки и уменьшением пористости пород отток растворов становился затрудненным и литостатические давления передавались на растворы, заключенные в этих породах, давление жидкости ($P_ж$) становилось выше гидростатического, начинались отжим растворов и новые перераспределения их как по удельным весам, так и под действием гравитационных сил пород. При этом наиболее легкие растворы отжимались, а наиболее тяжелые занимали их место. Так как отжим должен происходить во все стороны, то под так называемым «прессовым» давлением окружающие терригенные породы могли пропитываться тяжелыми растворами галогенных толщ. Отжатые тяжелые растворы перемещались в дальнейшем преимущественно под воздействием гравитационных сил. В зависимости от условий они могли размываться пресными водами, разбавляться или накапливаться и сохраняться в терригенных и карбонатных породах. В. И. Копнин отмечает, что физические диагенетические преобразования галогенных толщ сводятся к гравитационным (гравитационное перераспределение, дробление) и дислокационным процессам (складкообразование, дробление, брекчирование). В этих процессах, безусловно, значительную роль играют седиментационные рассолы.

Все химические процессы диагенеза для сульфатного типа вод изложены с достаточной степенью детальности в работах М. Г. Валяшко, В. А. Вахромеевой, А. И. Дзенс-Литовского и других исследователей. В. И. Копнин, обобщая эти работы, отмечает, что для химического диагенеза характерна пространственная масштабность, а для катагенеза — локальность развития минеральных преобразований. Без изменения химического состава наблюдаются

процессы перекристаллизации, минералообразование и дегидратация пород.

В таком общем виде их можно принять и для диагенеза хлоридных систем прошлого. Состав одновозрастных (сингенетичных) систем раствор—соль (порода), как уже отмечалось раньше, не мог меняться существенно и на стадии катагенеза, так как их фазы, насыщенные относительно друг друга, захороняются. Повышенные термодинамические условия, безусловно, способствовали смещению равновесия между фазами систем и чаще всего приводили к некоторому повышению растворимости солей.

Поведение систем хлоридный раствор—соль, находящихся в условиях, приближенных к подземной обстановке, специально не изучалось, поэтому можно лишь предположить, что повышение растворимости солей будет менее значительным в подземной обстановке из-за слабой подвижности жидкой фазы.

Наиболее заметные изменения могли происходить, по-видимому, на локальных участках в системе раствор—карбонатные породы. Но, как отмечает Н. В. Логвиненко, вторичные преобразования карбонатных пород изучены слабо. На стадии катагенеза основными процессами изменения являются перекристаллизация и частично метасоматоз, происходящий в присутствии растворов. Поэтому рассмотрим лишь те процессы, которые могут проявляться в подземной обстановке.

В глубинной обстановке CO_2, влияющий на карбонатное равновесие, может быть как биогенного, так и метаморфогенного генезиса. И. Г. Киссин и С. И. Пахомов экспериментально показали, что при воздействии дистиллированной воды на карбонатные породы при температурах до 250 °С в автоклаве происходит гидролиз карбонатов и выделение CO_2. При этом раствор магния (при температуре >100 °С) может переходить в породы. Повышение давления и концентраций CO_2 приводит к доломитизации карбонатов.

В то же время Е. Брайд отмечает, что в условиях нормальных пластовых давлений кальцит может стать нерастворимым на глубине ниже 3 км в результате уменьшения растворимости CO_2.

Н. К. Власова и М. Г. Валяшко поставили эксперименты по обоснованию реакций Мариньяка. В качестве исходного материала использовались хлоридно-магниевый раствор и карбонат кальция. При температурах 150—200 °С наблюдалось доломитообразование и переход магния в породы, а кальция в раствор. Они считают, что эта реакция является универсальной с точки зрения объяснения происхождения в подземной обстановке хлоридных рассолов с содержанием кальция больше магния и, в частности, происхождения рассолов Ангаро-Ленского бассейна. Однако состав ископаемых солей, четкий характер распределения всех элементов в седиментационных растворах, возрастные изменения химического состава подземных рассолов и, в частности, отношение Ca/Mg, широкое развитие седиментационных хлоридных рассолов с содержанием $Mg>Ca$ в пермских карбонатных и терригенных

породах в различных термодинамических условиях, и данные изотопных исследований свидетельствуют о том, что реакция доломитизации не может рассматриваться в качестве универсальной при построении региональных ретроспективных моделей. При проникновении вод инфильтрационного генезиса в систему раствор—соль происходили наиболее значительные изменения в системе. Эти процессы достаточно хорошо изучены и охарактеризованы в гидрогеологической литературе. Однако следует иметь в виду, что чаще всего проникновение этих вод в сингенетичные системы раствор—порода осуществляется в пределах локальных зон: краевые части артезианских бассейнов; тектонические нарушения и т. д. В данном случае, по существу, происходило разрушение сингенетичных систем.

Таким образом, общие данные о поведении сингенетичных систем раствор—соль (калийные, галит, сульфаты, карбонаты) в подземной обстановке не дают основания говорить о возможности существенного изменения состава растворов в региональном плане. Поэтому растворы этих систем сохраняли облик вод бассейнов седиментации, и чем выше была минерализация растворов, тем менее заметны были изменения в системе. Исключением из этого являлись, по-видимому, сингенетичные системы растворы—органогенные карбонаты и растворы — сульфаты кальция. Первые системы с момента формирования не являлись химически равновесными. Известно, что роль органогенных карбонатов стала преобладающей с мелового периода. Этот же период характеризуется возрастанием роли магния в седиментационных растворах. Поэтому с мелового периода вероятны существенные преобразования в этих системах. Вторые — в зависимости от присутствия органических соединений — весьма неустойчивы в зоне катагенеза при температурах выше 150 °С и могут превращаться в карбонаты.

Сингенетичные системы при нарушении изолированности подвергаются воздействию растворов, солей или газов и формируются новые сингенетично-эпигенетичные или эпигенетичные системы. В этом случае возможны несколько вариантов. Например, одна из фаз сингенетичной системы заменяется новой, физико-химически неравновесной первой. Вновь образованная система стремится к установлению равновесия между фазами, происходит растворение солей и обогащение раствора до предела его насыщения. И если подвижность раствора затруднена, то процесс может быть приостановлен, а в подземных условиях будет обнаружена система раствор—порода, в которой соли будут иметь одинаковые характеристики. Однако эти многообразные процессы при наличии сингенетичной системы имеют чаще всего локальное развитие и обычно не затрагивают всей сингенетичной системы.

Система раствор—терригенные породы. Состав твердой и жидкой фазы подземных гетерогенных систем вода—ионы—терригенные породы начинал формироваться в бассейнах седиментации (морских и континентальных) различной солености. Исходные ра-

Таблица 55

Степень уплотнения глинистых пород. *По В. Д. Ломтадзе*

Порода	Естественная влажность, %	Пористость %	Плотность скелета, г/см³	Консистенция
Глинистый ил	80—75	80—75	0,6—0,8	Жидкая, вязкотекучая
Глина мягкая	80—30	80—40	0,8—1,4	Текучая, пластичная
Глина уплотненная	35—12	45—25	1,35—1,9	Пластичная, полутвердая
Аргиллит	15—3	30—4	1,9—2,65	Полутвердая
Аргиллит сланцевый	3—4	4—5	2,65—2,75	Твердая

створы характеризовались хлоридным, сульфатным или карбонатным составом с широким размахом минерализации (от пресных до рассолов). В составе твердой фазы системы преобладали глинистые или песчаные отложения. Последующие преобразования эти системы претерпевали на стадии диагенеза и катагенеза.

Механические силы (давление вышележащих пород), приводившие к уплотнению пород и возрастанию доли твердой фазы в системе, приведены в табл. 55.

Образование осадков обычно происходило с переменной скоростью, что сказывалось на степени их уплотнения под действием гравитационных нагрузок. При этом глинистые отложения, накапливавшиеся «ураганным» темпом, оказывались недоуплотненными на период оттока поровых и межслоевых вод, иногда затягивающегося на десятки миллионов лет, а накапливающиеся чрезвычайно медленно, в зависимости от прочности образовавшегося минерального каркаса, — до достижения критических гравитационных нагрузок, которые в условиях господства медленной седиментации могли и не возникнуть. После отжатия седиментационных вод, по-видимому, происходила дегидратация осадков за счет высвобождения межслоевой и физически связанной воды в соответствии с моделью дегидратации глинистых отложений, разработанной М. Пауэрсом и Дж. Берстом и модифицированной Э. Перри и Д. Хоувером. Э. Перри и Д. Хоувер отмечают, что ход дегидратации зависит от геотермического градиента и выделяют четыре стадии. На первой стадии на глубинах до $4 \cdot 10^3$ фут ($\sim$1300 м) происходит отжатие седиментационных вод, при этом отмечается плавное изменение влажности от 80 до 6 %. Ниже на глубинах до $6 \cdot 10^3$ фут ($\sim$2000 м) и до $7{,}5 \cdot 10^3$ фут ($\sim$2500 м) при значениях геотермического градиента 9,4 и 7,4 °С/10^3 фут, соответственно, значение влажности остается постоянным. На второй и третьей стадиях на глубинах до $10 \cdot 10^3$ фут (3300 м) и до $14 \cdot 10^3$ фут

(4600 м) и при величинах геотермического градиента 9,4 и 7,4 °С/10^3 фут, соответственно, наблюдается резкое увеличение влажности до 30 % за счет отделения межслоевой и пленочной воды. На четвертой стадии происходит отжим оставшейся (5 %) межслоевой и пленочной воды. По А. М. Блоху, эта схема работает и при уплотнении осадочных толщ, лишенных набухающих компонентов.

Межслоевая вода, выделяющаяся в условиях высоких давлений и температур, отличалась не только аномально высокой плотностью, но и чрезвычайно низкой минерализацией и высокой растворяющей способностью по отношению к минеральным компонентам пород. Эти воды играли также большую роль в преобразовании органического вещества.

Отжимаясь в поровое пространство коллекторов через кровельную и подошвенную части глинистых толщ, седиментационные воды оказывались в иных геохимических условиях, что приводило к нарушению установившегося в них химического равновесия. При падении давления снижалась растворимость ряда соединений и происходила цементация порового пространства на границе подошвенной и кровельной частей коллекторов. Это, с одной стороны, отделяло различные типы вод и препятствовало их смешению, с другой — усиливало изоляцию гетерогенных систем в подземной обстановке.

В процессе дальнейшей дегидратации глин начиналось выделение межслоевой, а затем и физически связанной воды, отличающейся чрезвычайной агрессивностью по отношению к минеральным образованиям. Например, растворимость кремния в такой аномальной воде на 3—4 порядка выше, чем в дистиллированной воде. Это в свою очередь могло приводить к растворению как цементирующего, так и основного (каркасного) минерального материала коллектора. Пути движения вод различного генезиса и степень сохранности цементирующего вещества в достаточной степени можно лишь только предполагать. Так, с увеличением мощности быстро накапливающихся глинистых толщ увеличивался объем слабо минерализованных вод, внедряющихся в пласты-коллекторы на поздних этапах катагенеза. В связи с этим А. А. Карцев и С. Б. Вагин считают, что конечная минерализация пластовых вод застойных бассейнов зависит от объема внедрившейся в коллекторы слабо минерализованной воды. По нашему мнению, минерализация пластовых вод не находилась в такой прямой зависимости от количества поступивших маломинерализованных вод, так как движение последних не могло являться поршневым вытеснением более минерализованных вод или простым смешением. При описании галогенных систем было показано, что растворы различной плотности ведут себя как несмешивающиеся жидкости и разделяются под воздействием гравитационных сил. При невысоких скоростях перемещения растворов в подземных условиях, под действием давления отжима, гравитационных сил и наличия относительной изоляции отжимающихся маломинерализованных раство-

ров по отношению к седиментационным растворам карбонатных пород или песчаников, очевидно, в кровле водоносного комплекса могла создаваться определенная зона перемещения маломинерализованных вод. Эти воды могли разгружаться по ослабленным тектоническим литологическим или структурным зонам (например, движение маломинерализованных вод среди соленых в Западно-Туркменском артезианском бассейне). В то же время в отдельных структурах и тектонических зонах, литологических ловушках могли накапливаться опресненные воды над рассолами. Явление накопления опресненных вод над рассолами наблюдалось при исследованиях нефтяных структур. Такой вероятный механизм перемещения подтверждают данные о сохранении седиментационных вод в карбонатных и песчаных породах при наличии мощных глинистых водоупоров.

Надо отметить, что уже давно высказано предположение о движении флюидов в седиментационных бассейнах в результате их отжима из наиболее погруженных частей бассейна к его периферии. В начале 60-х годов эти представления получили развитие в работах А. А. Карцева, Ю. В. Мухина и других исследователей. Гидродинамический режим, который связан с постседиментационным уплотнением и дегидратацией глинистых толщ, получил название, по А. А. Карцеву, седиментационного, по Н. Б. Вассоевичу, элизионного, по Е. А. Барс,—экспеляционного. Следует иметь в виду, что масштабы этого процесса при сохранении намеченного механизма отжима менялись во времени в связи с эволюцией глинистого вещества и, в частности, с возрастающей ролью монтмориллонита и вермикулита.

В осадочных породах в зависимости от степени дисперсности распределяется относительная концентрация органического вещества (ОВ). При прочих равных условиях она проявляется в последовательном уменьшении содержания ОВ в фациальном ряду глина⇄алеврит⇄песок соотношением порядка 4 : 2 : 1 (закономерность Траска).

Это проявляется как в современных, так и древних отложениях. По мнению В. А. Успенского, в случае отсутствия достаточных количеств сорбирующего глинистого материала главная масса водорастворенного органического вещества избегает поглощения и удаляется при уплотнении осадка вместе с иловыми водами. На повышение глинистости осадков и обогащение их ОВ влияет также темп седиментации. Обогащение глинистым веществом и ОВ наблюдается в бассейнах с высоким темпом накопления осадков. Вместе с органическим веществом захороняются и биогенные элементы (N, P, Si, Fe, I и другие). Однако содержание биогенных веществ, и в частности йода, в ОВ зависит от степени его преобразования. Чем выше степень преобразования, тем меньше йода в ОВ. В то же время данные, приводимые О. В. Шишкиной, для вод пелагических осадков показывают, что органическое вещество может быть в достаточной степени преобразовано уже в процессе седиментации. При незначительном изменении органического ве-

щества на стадии диагенеза происходят более интенсивные процессы преобразования седиментационных вод вследствие процессов сульфатредукции, сопровождающиеся выделением CO_2 и выпадением карбонатов. Интенсивность сульфатредукции (от кембрия до четвертичного периода) повышалась, вероятно, в результате возрастания роли сульфатов в водах седиментационных бассейнов и уменьшения давления CO_2 и увеличения количества органического вещества в осадках. А. Б. Ронов отмечает, что среднее содержание $C_{орг}$ в породах палеозоя составляет 0,34 %, а в мезокайнозое 0,64 %, т. е. увеличение $C_{орг}$ произошло в два раза [44]. Это, естественно, должно было сказаться как на интенсивности процесса сульфатредукции, так и на накоплении ряда элементов биогенной миграции в седиментационных водах.

Наиболее значительным процессом, ведущим к химическому преобразованию растворов в системе раствор — глинистые породы, является реакция ионного обмена. Основные факторы, влияющие на реакции ионного обмена, следующие: 1) наличие обменных компонентов в подвижной фазе; 2) соотношение pH и Eh; 3) общий химический состав среды; 4) давление и температура. Обменными для глинистых минералов могут быть как катионы, так и анионы. По структурным причинам в каолините, галлуазите и хлорите преобладает абсорбция анионов, в монтмориллоните и гидрослюдах — катионов. Опыты по ионному обмену, проведенные Х. Дженни, показали, что в разбавленных водных растворах существуют следующие ряды обменной способности ионов: $Li<Na<K<Rb<Cs$ и $Mg<Ca<Sr<Ba$. В реакциях ионного обмена могут участвовать и органические соединения, которые часто прочно связываются с глинистыми минералами.

Даже приблизительные значения обменной способности глинистых минералов, приводимые Э. Дегенсом (каолинит 3—15 ммоль/100 г, галлуазит 5—50, иллит 20—40, монтмориллонит 80—100 и вермикулит 100—150 ммоль/100 г), свидетельствуют о том, что в течение фанерозоя процесс ионного обмена менялся во времени. В общем виде он достаточно подробно рассмотрен в работах А. Н. Бунеева, Н. С. Спиро, И. С. Грамберг. Однако с палеоген-неогенового периода состав седиментационных рассолов начинает резко обедняться кальцием. И если в водах бассейнов седиментации до палеогенового периода поглощенный комплекс глин имел возможность насыщаться кальцием, стронцием и барием до выпадения последних в осадок, то после этого периода начинает все больше захватываться магния и одновалентных катионов. Это, с одной стороны, повлияло на обедненность вод бассейнов седиментации одновалентными катионами (Li, Rb, Cs, K) с этого времени, с другой — создало предпосылки для протекания реакций на стадии диагенеза с образованием растворов, отличающихся от состава вод бассейнов седиментации. Эти процессы, по-видимому, частично напоминают современные, а сульфатные и хлоридные воды с $Mg>Ca$ могли преобразовываться в щелочные или хлоридные (с $Ca>Mg$) воды.

Уплотнение песчаных пород на стадии диагенеза связано с изменением способа укладки зерен, процессами растворения и цементации. Песчаные породы могли быть представлены граувакками, основными и кислыми аркозами и кварцем. Стадии диагенеза и катагенеза, обычные для всех пород,— это продолжение функций гипергенеза. И в зависимости от pH и Eh среды, минерализации и подвижности вод, температуры и давления, на этих стадиях может происходить дальнейшее разложение силикатов и обогащение растворов минеральным веществом. Однако в малоподвижной водной среде и при высоких минерализациях влияние этих процессов на состав вод, по-видимому, малоощутимо.

С. Л. Шварцев [48] отмечал, что при гидролизе силикатов происходит химическое разложение воды в значительных масштабах. Это, по-видимому, является одним из основных факторов концентрирования подземных вод в терригенных породах. Таким образом, рассмотрение сингенетичных гетерогенных систем раствор—порода показывает, что в этих системах в процессе диагенеза и катагенеза от кембрия до четвертичного времени происходили процессы преобразования растворов, зависящие от состава систем, физико-химических и термодинамических условий. В течение этого периода направленно изменялись состав твердой и жидкой фаз систем, окислительно-восстановительные реакции, ионный обмен, процессы гидролиза и метасоматические процессы, количество и качество газа и органических соединений, биологические процессы. В обобщенном виде о формировании и преобразовании растворов в этих системах можно сказать следующее.

Системы раствор—галит и раствор—калийные соли. От кембрия до четвертичного периода состав жидкой фазы систем соответствовал исходному составу рассолов солеродных бассейнов с возможным незначительным концентрированием в подземной обстановке. Породы этих систем под действием собственного давления и давления вышележащих толщ превращались в непроницаемые водоупоры, а отжатые растворы под действием этих и гравитационных сил в растворах замещали облегченные растворы внутри как галогенных толщ, так и окружающих их пород, и при определенных условиях могли скапливаться в подсолевых отложениях. Минерализация этих растворов, как правило, превышает 320 г/л.

Системы раствор—карбонатные породы. Эти системы до мелового периода становились все менее химически равновесными как с сингенетичными растворами, так с растворами сульфатов, галита и калийных солей в связи с уменьшением роли хемогенных карбонатов (известняков и доломитов). С мелового периода биогенные карбонаты становятся преобладающими, а системы неравновесными.

Системы раствор—сульфаты. Сульфаты пород и растворов неустойчивы в подземной обстановке в результате биогенной и абиогенной десульфатизации. Под давлением сульфатные породы нередко становятся водонепроницаемыми.

Системы раствор—песчаные породы. В процессе гидролиза силикатов возможны значительные процессы концентрирования растворов и частичный переход минерального вещества в растворы. Нередки процессы подщелачивания среды.

Системы раствор—глинистое вещество. Основное влияние на состав поровых растворов оказывают процессы сульфатредукции и ионного обмена. Наиболее существенные изменения наблюдались с палеоген-неогенового времени. Глинистые породы при уплотнении питали окружающие системы вначале поровыми растворами, а затем дегидратационными водами, и превращались в породы с весьма слабой водопроницаемостью. Значительная часть воды глинистых пород расходовалась на процессы гидролиза силикатов. С глинистыми породами связаны также основные запасы органического вещества, которые при метаморфизации отдавали воду, углекислый газ, аммиак, углеводороды, фенолы, органические кислоты и ряд биогенных элементов (йод, бром и др.). Присутствие CO_2 подщелачивало и опресняло растворы. Максимальное количество органического вещества было отложено в мезо-кайнозойское время.

Благодаря чередованию водоносных и водоупорных толщ названные системы с различной долей участия формировали водоносные слои, горизонты и комплексы определенного возраста. Сохранению этих водоносных толщ способствовал ряд факторов, одним из которых являлся структурно-тектонический. Подземные воды этих водоносных толщ имели тот же состав, что и растворы тех систем, с которыми они были связаны. Судя по основным сведениям о формировании и преобразовании систем, можно заключить, что до юрско-мелового времени исходный химический состав хлоридных и сульфатных рассолов, захороняющихся в под- и межсолевые отложения и вне развития галогенных толщ, претерпевал наименьшие изменения. Этим можно объяснить эмпирические закономерности, свидетельствующие, что состав исходных хлоридных систем одновозрастных водоносных комплексов различных артезианских бассейнов СССР имеет близкие значения отношений Ca/Mg и относительных концентраций макро- и микрокомпонентов. Состав рассолов одновозрастных водоносных комплексов от кембрия до юрско-мелового времени определялся преимущественно степенью концентрирования вод бассейнов седиментации, поэтому одновозрастные рассолы характеризовались однотипными функциональными зависимостями $y=kx$ или неполной функцией $y=kx-b$. В связи с этим в общем составе подземных рассолов при переходе от древних к более молодым водоносным комплексам происходило увеличение содержания натрия и уменьшение концентраций кальция, калия, брома, стронция, рубидия, цезия и ряда других микроэлементов. Однако уже в водоносных комплексах юрского времени для рассолов с минерализацией менее 150 г/л начинают наблюдаться процессы изменения общего состава подземных вод в терригенных отложениях морского и континентального генезиса. В водоносных комплексах неоген-четвертичного воз-

раста изменения общего состава рассолов наиболее существенны: в солевых отложениях состав рассолов соответствует составу вод бассейнов седиментации, а за пределами развития солей наблюдается развитие вод хлоридного, сульфатного и карбонатного типов, что с общих позиций развития систем находит логическое объяснение.

Следует отметить, что в каждом водоносном комплексе наибольшую возможность для сохранения имеют седиментационные растворы максимальной минерализации, так как они под действием гравитационных сил обычно занимают наиболее опущенные участки комплекса.

Таким образом, намеченная общая ретроспективная модель формирования подземных промышленных вод с учетом эволюции оболочек земли в фанерозое и физико-химических процессов в поверхностных и подземных условиях, по нашему мнению, наиболее логично объясняет полученные эмпирические закономерности. Эта модель может быть также использована в геохимии, литологии и учении о полезных ископаемых. Дальнейшая ее конкретизация как в общем, так и в частном плане требует детализации данных по статическим и динамическим системам.

Часть II

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Глава 6

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И ТИПИЗАЦИЯ

ПОНЯТИЕ О МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ИХ ВЫДЕЛЕНИЯ

Необходимость введения понятия «месторождения» связана с несколькими причинами. Пожалуй, главной из них следует считать вовлечение в разведку большого числа объектов минеральных, промышленных и теплоэнергетических вод и рост затрат на их разведку. Для обоснования постановки разведочных работ, их проектирования и оценки запасов подземных вод требовалось иметь такое понятие, в котором в сконцентрированном виде отражались бы геолого-гидрогеологические, народнохозяйственные, экономические и другие факторы. Именно термин «месторождение» концентрированно включает совокупность всех вышеназванных факторов, использование этого понятия оказалось весьма удобной формой для решения методических и прикладных задач в области разведки оценки эксплуатационных запасов подземных вод и их освоения.

Понятие о месторождении оказалось весьма полезным при региональных оценках прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных промышленных, теплоэнергетических и минеральных вод. При весьма широком региональном распространении упомянутых типов вод число месторождений оказалось достаточно ограниченным, что особенно четко проявилось при мелкомасштабном картировании месторождений промышленных (в частности, йодо-бромных) вод. В меньшей степени это относится к минеральным водам, вследствие исключительно малых водоотборов в пределах подавляющего большинства месторождений этих вод. Однако число месторождений с наиболее ценными типами углекислых минеральных вод также ограничено.

Общей классификации месторождений глубоких подземных вод еще не существует. Связано это с объективными и субъективными причинами. Наиболее важной из них, по-видимому, следует считать то, что в нашей стране использование подземных вод любых типов осуществляется преимущественно по конкретному целевому назначению. Именно подразделение вод по их целевому использованию в народном хозяйстве служит основой для разработки их

Таблица 56

Подразделение месторождений подземных вод на группы по степени сложности

Группа	Сложность природных условий				Целесообразность выявление по данным разведочных работ запасов категорий
	Геологические	Гидродинамические и фильтрационные	Гидрогеохимические	Гидрогеотермические	
Первая	Простые	Простые	Простые	Простые	А, В, C_1
Вторая	Умеренно сложные	Сложные	Сложные или простые	Простые	А, В, C_1
Третья	Сложные	Сложные и весьма сложные	Весьма сложные	Сложные и весьма сложные	В, C_1

классификации и типизации. Хотя этот принцип подразделения вод в целом достаточно формален и иногда трудно, например, отделить минеральные воды от теплоэнергетических, тем не менее он является основным, и это обстоятельство нельзя не учитывать.

На основе принципа целевого использования вод базируются нормативные документы (инструкции, методические руководства и др.), осуществляются финансирование геологоразведочных работ, проектирование и строительство водозаборов и, в известной степени, планируются и осуществляются научно-методические исследования. В связи с этим ниже будут изложены основы классификации или типизации месторождений для промышленных, теплоэнергетических и минеральных вод, т. е. в зависимости от целевого использования вод.

Для решения практических задач при разведке и освоении месторождений подземных вод всех типов используется подразделение их на три группы по степени сложности (табл. 56). Степень сложности в данном случае определяется геолого-гидрогеологическими, т. е. природными особенностями месторождения, но при этом учитываются и экономические факторы, в частности, затраты на проведение разведочных работ и исследований.

Сложность геологических условий месторождений определяется прежде всего тектоническими факторами, а также литолого-фациальной неоднородностью как продуктивных водоносных комплексов, так и примыкающих к ним водоупорных пород. Сложность фильтрационных условий определяется в основном неоднородностью водовмещающих пород. С известной условностью водовмещающие породы-коллекторы целесообразно подразделять на три группы: 1) условно однородные водоносные горизонты (удельные дебиты скважин различаются не более, чем в 5 раз); 2) неоднородные горизонты (удельные дебиты различаются в 5—10 раз); 3) весьма неоднородные горизонты (удельные дебиты различаются более, чем в 10 раз). Степень сложности гидрогеохимиче-

ских и гидрогеотермических условий определяет надежность прогнозирования качества вод в процессе эксплуатации.

По характеру гидрогеохимических и гидрогеотермических условий месторождения глубоких подземных вод подразделяются на:

— простые — источники изменения качества воды отсутствуют; температурные условия относительно однородны; границы вод некондиционного состава удалены на большое расстояние от эксплуатационных участков; указанные границы проходят вблизи участка эксплуатации, но имеют простую конфигурацию, а водоносный горизонт представлен однородными породами. В этих условиях возможные изменения минерализации, химического состава и температуры воды в процессе эксплуатации устанавливаются расчетным путем, в том числе и при эксплуатации с поддержанием пластового давления;

— сложные — границы зон с различным качеством подземных вод имеют сложную конфигурацию в плане и в разрезе; водоносные горизонты в фильтрационном отношении неоднородны; температурные условия также относительно неоднородны; перекрываются или подстилаются водоносными пластами, содержащими воды некондиционного качества, причем в процессе эксплуатации возможно вертикальное перетекание. В этих условиях при однородности разделяющих водоупоров возможные изменения качества вод устанавливаются расчетным путем, в том числе с применением методов моделирования. В расчеты необходимо вводить большой запас надежности;

— весьма сложные — границы зон с различным качеством воды имеют сложную конфигурацию в плане и разрезе; температурные условия весьма неоднородны; водоносные комплексы (горизонты) или зоны приурочены к неравномерно-трещиноватым или закарстованным породам; водоупоры неоднородны, имеют гидравлические «окна», по которым возможно поступление некондиционных вод из смежных горизонтов или водоносных зон. Сложное взаимоотношение вод различного состава и (или) температуры может быть легко нарушено, особенно при отборе в объемах, превышающих естественные ресурсы этих зон. Возможные изменения качества воды оцениваются приблизительно на основе анализа общей гидрогеологической обстановки, по опыту эксплуатации аналогичных месторождений и на основе интерпретации данных длительных групповых опытно-эксплуатационных выпусков (откачек).

В обобщенном виде степень сложности месторождений находит выражение в категориях запасов и требованиях к их соотношению для подготовленности месторождения к промышленному освоению. Так, например, на месторождениях наиболее сложной третьей группы выявление запасов категории А экономически не оправдано, так как для этого либо требуются слишком большие затраты, либо выявление запасов этой категории вообще невозможно.

В настоящее время предложены понятия для месторождений всех типов подземных вод — пресных, минеральных, промышлен-

ных и теплоэнергетических. Впервые понятие «месторождение» применительно к глубоким подземным водам было введено А. М. Овчинниковым для минеральных вод, являющихся наиболее интересными и длительно изучаемыми объектами в гидрогеологии. А. М. Овчинниковым под месторождением минеральных вод понимались пространственно оконтуриваемые скопления воды определенного состава в количествах, достаточных для экономически целесообразного их использования.

Хотя это определение является недостаточно полным, но в нем уже присутствуют все основные элементы, необходимые для выделения месторождений подземных вод различных типов. По аналогии с месторождениями традиционных полезных ископаемых (твердые, нефть, газ) здесь предполагается, что месторождение подземных вод имеет некоторые границы; заключенная внутри этих границ вода должна отвечать установленным кондициям и использование воды должно быть экономически оправдано. В то же время в этом определении присутствует неопределенный термин скопление, который не имеет ясной трактовки.

В современном представлении понятие «месторождение» несколько трансформировалось и стало более четким. В общем виде понятие «месторождение» трактуется как пространственно ограниченная водонапорная система (или часть ее), в пределах которой распространены один или несколько водоносных комплексов, заключающих подземные воды, пригодные по своему качеству и количеству для экономически рентабельного использования в народном хозяйстве, по тому или другому назначению. Иначе говоря, внутри контура месторождения заключены (или могут быть выявлены) эксплуатационные запасы подземных вод, предназначенные для одноцелевого или комплексного использования. Причем возможность выявления в пределах месторождения эксплуатационных запасов подземных вод определяется как природными особенностями месторождения, так и искусственными факторами (например, применение закачки на месторождениях промышленных и теплоэнергетических подземных вод).

Участки месторождения, намечаемые для размещения проектных водозаборов, называются водозаборными, или эксплуатационными участками. Таких участков на месторождении может быть один или несколько. Рассмотрим содержание основных элементов, входящих в понятие «месторождение».

Границы месторождений подземных вод определяются различными способами. Наиболее простой вариант, когда границы имеют геологический смысл. В качестве типичных примеров геологических границ следует назвать выклинивание или литолого-фациальное замещение водовмещающих пород, непроницаемые тектонические нарушения (экраны), выходы на поверхность водоупорных пород по всему контуру месторождения (или части его), резкое ухудшение фильтрационных свойств под влиянием эпигенетических преобразований и др. Геологические границы месторождений устанавливаются без особых затруднений.

Для месторождений промышленных, минеральных и теплоэнергетических вод границы имеют нередко иное (чем геологическое) содержание. В пределах горноскладчатых областей, как известно, очень широко распространены наиболее интересные типы минеральных вод (углекислые воды, азотные термы). Выходы их контролируются благоприятными геологическими структурами: зонами дроблений, растяжений и т. д. Однако минеральная вода нередко занимает лишь часть трещиноватых зон и границы только частично являются геологическими, а оконтуривание месторождений производится по изолиниям концентраций компонентов, определяющих бальнеологические свойства воды (сероводород, углекислота, радон, общая минерализация, температура и т. д.). Аналогичным образом оконтуриваются месторождения минеральных вод при разгрузке их из трещинно-жильных в пластовые водонапорные системы. Гидрогазохимические или гидрогеотемпературные границы являются динамически неустойчивыми и могут изменять свое положение в пространстве при отборе минеральной воды скважинами, а иногда в результате изменений атмосферного давления, естественных колебаний уровня, при землетрясениях и т. д.

Близкий подход используется при оконтуривании месторождений парогидротерм в трещинно-жильных или пластово-трещинных водоносных системах. Сложное строение геотермальных систем в районах активного вулканизма усложняет задачу выделения и оконтуривания месторождений (или участков). Наряду с геолого-гидрогеологическими факторами, ведущим здесь является температурный показатель (температура, теплосодержание).

Месторождения промышленных и теплоэнергетических вод в пластовых водонапорных системах оконтуриваются наиболее часто с использованием экономических критериев. Целевой задачей выявления месторождений с геолого-экономических позиций является пространственное оконтуривание в плане и разрезе той части водонапорной системы, где добыча и использование подземных вод по заданному назначению экономически оправданы. Вещественным выражением экономических критериев является соответственно концентрация какого-либо компонента или температура (теплосодержание) воды. При многоцелевом использовании подземных вод граница имеет стоимостное выражение; для этого введен показатель, получивший название «ценности воды» (речь идет о стоимости полезной продукции или тепла, заключенного в единице объема или массы воды). Нижняя граница месторождения (в разрезе) с большой мощностью осадочного чехла имеет также экономическое содержание и выражается через предельную (по экономическим соображениям) глубину эксплуатационных скважин.

Качество подземных вод для использования их по заданному назначению (т. е. как промышленных, минеральных и теплоэнергетических) устанавливается в соответствии с требованиями нормативных документов или потребителя. Например, для минеральных вод качество их регламентируется временными нормативами,

включающими ряд показателей, и заключениями специализированных институтов; в последующем намечается утверждение соответствующего государственного стандарта на питьевые минеральные воды. Для промышленных и теплоэнергетических вод установление жестких стандартов пока не представляется возможным и в этом нет необходимости. Для этих подземных вод основные требования к качеству оформляются в виде показателей кондиций. В число этих показателей включаются содержания промышленных компонентов или полезные свойства воды (например, температура, теплосодержание), а также содержание вредных примесей, препятствующих использованию вод по заданному назначению или осложняющих технологию их переработки.

Оценка качества подземных вод является одной из главных задач изучения месторождений глубоких подземных вод. В соответствии с целевым назначением воды изучаются ее физические свойства, общий химический состав, газовый состав, содержание микрокомпонентов. Для разных типов вод применяются соответствующие методики изучения качества. Детальность и достоверность определения показателей качества вод зависит от условий отбора водных проб, полноты и точности лабораторных исследований. Методы анализа природных вод и рассолов постоянно совершенствуются и сейчас имеется принципиальная возможность определения в водах большинства элементов с высокой точностью.

Количество вод, имеющихся внутри контура месторождения,— столь же важный фактор, определяющий практическую ценность месторождения. Причем оценка количества воды представляет несомненно более сложную задачу, чем установление качества подземных вод. Дело в том что большие глубины залегания промышленных, минеральных и термальных вод и существенная пространственная изменчивость значений параметров не позволяют изучать гидрогеологические параметры и граничные условия продуктивных водоносных комплексов с такой же детальностью, как на месторождениях пресных подземных вод, из-за высокой стоимости разведки. Поэтому оценка количества вод выполняется обычно по ограниченному объему информации, и здесь многое зависит как от степени сложности месторождения, так и от применяемых при разведке технических средств и приборов.

Количество вод на разведанных месторождениях выражается суммарной величиной эксплуатационных запасов, которые подсчитываются по отдельным водозаборным участкам. Мерой оценки количества воды на не изученных специальными гидрогеологическими разведочными работами месторождениях служат прогнозные ресурсы (Р), которые подсчитываются на основе единичных, зачастую косвенных данных и общих соображений с использованием соответствующих методических приемов.

Способы оценки эксплуатационных запасов различных типов вод рассматриваются в соответствующих разделах данной работы. Здесь же высказываются некоторые соображения о достоверности подсчета прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов

подземных вод в глубоких водоносных комплексах. Достоверность зависит от многих причин, но главным образом от точности определения гидрогеологических параметров и адекватности расчетных схем природным особенностям месторождения. Причем неточности как в определении параметров, так и схематизации природных условий могут приводить к погрешностям в оценке величины запасов разных порядков. На месторождениях с относительно простыми геолого-гидрогеологическими условиями более существенное значение имеет степень точности определения гидрогеологических параметров, а на месторождениях со сложным строением на первое место, пожалуй, выдвигается знание граничных условий, так как неправильная схематизация природных условий может приводить к принципиальным ошибкам в сторону как занижения, так и завышения запасов. Наиболее вероятны ошибки при оценке запасов месторождений в трещинно-жильных системах, где гидрогеологические прогнозы практически невозможны, и тем не менее на ранних этапах изучения таких месторождений к прогнозам все же приходится прибегать, поскольку требуется оценить примерные масштабы месторождения и обосновать целесообразность вовлечения месторождения в разведку.

Месторождения глубоких вод имеют различные источники обеспечения эксплуатационных запасов. На месторождениях глубоких вод в пластовых водонапорных системах эксплуатационные запасы формируются преимущественно за счет упругой составляющей естественных (емкостных) запасов, образующихся в процессе геологического развития седиментационных бассейнов. Другие возможные источники формирования эксплуатационных запасов (перетекание из смежных горизонтов, отжатие воды из глин) оценить пока не представляется возможным. На месторождениях в трещинно-жильных водонапорных системах или в очагах глубинной разгрузки в пластовых системах основным источником формирования эксплуатационных запасов служат естественные ресурсы, а роль естественных запасов, в том числе упругих, обычно невелика.

В случае проявления упругой составляющей естественных запасов, эта часть эксплуатационных запасов может рассматриваться как невозобновляемая, а при обеспечении ее естественными ресурсами она постоянно возобновляется (если подсчет осуществлен в пределах величины естественных ресурсов). Однако сложившаяся в настоящее время практика учета эксплуатационных запасов не делает каких-либо различий и во всех случаях запасы учитываются в единицах расхода. Для эксплуатационных запасов с невозобновляемыми источниками формирования это создает иллюзию их неизменности за весь период эксплуатации, так как на последний год эксплуатации на балансе числится столько же запасов, сколько и на первый год. Фактически при эксплуатации идет непрерывное уменьшение запасов (в недрах) и в предельном случае (когда дебит водозабора равен величине утвержденных эксплуатационных запасов) при достижении в скважинах уровней, установленных кондициями, запасы должны быть практически

полностью выработаны. Следовательно, эксплуатационные запасы при обеспечении их невозобновляемыми источниками питания целесообразно утверждать не только в единицах расхода, но и в объемных (массовых) единицах. В этом случае появляется возможность следить за движением запасов в процессе эксплуатации и иметь представление об остаточных запасах на любой год эксплуатации.

При выявлении и оценке месторождений следует учитывать необходимость комплексной переработки сырья, решение вопросов сброса отработанных вод, обеспечение технической и питьевой водой, электроэнергией, рабочей силой, материалами и т. д. В то же время методы оценки эксплуатационных запасов промышленных вод отличаются от оценки запасов традиционных полезных ископаемых (минерального сырья), а обычно применяется методика, используемая для подсчета запасов пресных и других типов вод. Эти особенности и приходится учитывать при выявлении, оконтуривании и разведке месторождений подземных промышленных вод. Величина эксплуатационных запасов определяется природными особенностями месторождений (граничные условия, гидрогеологические параметры) и техническими возможностями снижения уровня в эксплуатационных скважинах. Экономика же добычи и переработки вод частично зависит от природных факторов (глубина залегания продуктивных комплексов, содержание полезных компонентов, присутствие вредных примесей и др.), но главным образом от состояния техники и технологии добычи и переработки подземных промышленных вод. Затраты на добычу и переработку подземных промышленных вод пока достаточно велики. Не всегда уровень техники и технологии добычи и переработки промышленных вод приводит к преуменьшению реальных возможностей месторождений и снижению эффекта от использования их запасов. Тем не менее приходится исходить из реального положения вещей и ориентироваться на те элементы, содержащиеся в подземных водах, которые извлекаются в промышленных масштабах и на которые установлены оптовые цены. Исходя из этих цен и расчетных затрат на добычу, очистку, транспортировку и переработку воды определяются кондиционные показатели, в том числе «бортовое» содержание полезных компонентов или граница месторождения. Вполне понятно, что комплексное использование вод месторождения приводит к снижению «бортового» содержания и как бы к расширению размеров месторождения. В связи с внедрением метода отработки месторождений с применением обратной закачки отработанных вод в продуктивные водоносные комплексы используются иные критерии при обосновании кондиционных требований и установлении границ месторождений.

Таким образом, к настоящему времени сложились обоснованные и устоявшиеся представления о месторождениях глубоких подземных вод (промышленных, минеральных и теплоэнергетических), способствующие успешному региональному изучению закономерностей их распространения, разведке и освоению. Вместе с

тем некоторые вопросы требуют дальнейшей доработки, в том числе необходимость совершенствования системы государственного учета балансовых эксплуатационных запасов глубоких подземных вод. Точные формулировки месторождений промышленных, минеральных и термальных вод даются в соответствующих инструкциях ГКЗ СССР по применению классификации прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод [18, 19, 20].

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОД

Подземные промышленные воды служат минеральным сырьем для обеспечения производственных мощностей по их переработке. В связи с этим к месторождениям таких вод предъявляются требования, как и к многим традиционным видам сырья: возможность создания предприятия с определенной мощностью в соответствии с потребностями народного хозяйства, обеспечение необходимого уровня рентабельности использования подземных вод и другие. Месторождения промышленных вод по геолого-гидрогеологическим условиям и особенностям методики разведки с учетом определяемой классификацией группы сложности принято подразделять на несколько типов: 1) месторождения пластового типа в крупных артезианских бассейнах платформ и плит; 2) месторождения пластового типа в артезианских бассейнах межгорных и предгорных впадин; 3) месторождения трещинно-жильного типа горноскладчатых областей и районов современного вулканизма; 4) месторождения в озерных понижениях.

Месторождения первого типа находятся внутри крупных артезианских бассейнов древних платформ и эпипалеозойских плит. Осадочные чехлы платформ и плит, с которыми связаны продуктивные водоносные комплексы, имеют возраст пород от протерозоя до кайнозоя, различную мощность, обычно спокойное залегание. Месторождения этого типа, как правило, многопластовые, имеют большие размеры в плане, характеризуются выдержанностью по площади фильтрационных свойств и гидрогеохимических показателей, значительной величиной эксплуатационных запасов. По содержанию полезных компонентов они относятся к однокомпонентным (например, йодные или бромные), хотя содержат полезные компоненты, которые могут извлекаться попутно. Источниками формирования эксплуатационных запасов служат в основном упругие запасы продуктивных горизонтов, в связи с чем при эксплуатации образуются глубокие и значительные по площади депрессионные воронки. По характеру коллекторов продуктивные водоносные комплексы подразделяются на поровые, порово-трещинные, трещинные и трещинно-карстовые. Наибольший практический интерес представляют горизонты с поровыми и порово-трещинными коллекторами, но в последнее время начали вовлекаться в эксплуатацию и карбонатные водоносные комплексы с трещинными и трещинно-карстовыми коллекторами.

Эксплуатационные участки на платформенных месторождениях выбираются в основном по технико-экономическим показателям эксплуатации с учетом условий сброса отработанных вод. Характерные месторождения рассмотренного типа — это Краснокамское на Русской платформе и Тюменское на Западно-Сибирской плите.

Месторождения второго типа отличаются сложной геолого-тектонической и гидрогеологической обстановкой. Продуктивные водоносные горизонты расчленены тектоническими нарушениями на серию блоков; фильтрационные свойства пород и гидрогеохимические показатели воды могут существенно изменяться как в отдельных блоках, так и от блока к блоку. Месторождения этого типа приурочены к ограниченным в плане пластам или крутым антиклинальным складкам. В последнем случае глубины залегания продуктивных горизонтов изменяются от первых сотен метров в ядрах складок до 2000—3000 м на их крыльях. Эксплуатационные запасы промышленных вод месторождений второго типа значительные, а состав вод позволяет извлекать два и более полезных компонентов.

Источниками формирования эксплуатационных запасов служат упругие запасы продуктивных горизонтов, перетекание из смежных горизонтов, отжатие воды из глин, инверсия разгрузки глубоких вод, осушение пластов в краевых или приподнятых частях продуктивных горизонтов.

Водовмещающие породы представлены мощными песчано-глинистыми толщами с коллекторами порового типа. Вследствие слабой уплотненности пород при опробовании и эксплуатации скважин часто наблюдается пескование.

Для месторождений второго типа характерны высокие температуры и избыточные напоры, большая газонасыщенность пластовых вод, вплоть до присутствия газовых шапок. Эти обстоятельства осложняют проведение опытно-фильтрационных работ и определение гидрогеологических параметров по данным опытных работ.

Положение эксплуатационных участков и конструкции водозаборов на месторождениях второго типа определяются прежде всего геологоструктурной обстановкой (глубина залегания продуктивных горизонтов), а также фильтрационными и гидрогеохимическими особенностями. Ко второму типу относятся большинство месторождений промышленных вод.

Месторождения третьего типа пока не эксплуатируются в качестве промышленных. Они более известны как месторождения минеральных или теплоэнергетических вод, но в определенных условиях воды этих месторождений могут представлять интерес для извлечения таких полезных компонентов, как бор, мышьяк и др. В геологическом отношении месторождения приурочены к комплексам интрузивных, метаморфических, вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород, отличающихся очень низкими фильтрационными и емкостными свойствами. Обводненность пород связана с зонами тектонических нарушений и особенно с узлами пере-

сечения нарушений различного направления. Для месторождений этого типа характерны исключительная фильтрационная неоднородность и неустойчивость гидрогеохимических показателей как в естественных, так и нарушенных условиях.

Источники формирования эксплуатационных запасов, как правило, по данным разведочных работ установить не представляется возможным. Оценка запасов производится в пределах величины естественных ресурсов по данным продолжительных групповых выпусков. Методика разведки месторождений трещинно-жильного типа пока разработана слабо.

Месторождения четвертого типа связаны с современными озерными понижениями или эвапоритовыми бассейнами, заполненными рапой различного состава. Наиболее известным месторождением этого типа является оз. Серлс в Калифорнии (США), на базе подземных рассолов которого созданы крупные предприятия по переработке рассолов.

В СССР известны два подтипа месторождений, связанных с озерными понижениями. К первому подтипу относятся месторождения в современных эвапоритовых бассейнах, в разрезе которых имеется несколько горизонтов (до 2—3) сильнопористых солей (галита, астраханита и др.), разделенных прослоями илов или мелкозернистых песков. Пористые соли имеют исключительно высокие фильтрационные свойства и заключают рассолы, обычно отличающиеся по своему составу от поверхностной озерной рапы.

Подземные рассолы обладают небольшим напором и гидравлически связаны с озерной рапой в озере. Эксплуатация рассолов осуществляется обычно при установившемся режиме. Сложность представляет прогноз качества рассолов. Эксплуатационные запасы обеспечиваются в основном естественными запасами, но промышленные рассолы дополнительно могут формироваться за счет растворения вмещающих солей при эксплуатации. Типичное месторождение этого подтипа — котловина залива Кара-Богаз-Гол.

Месторождения второго подтипа связаны с терригенными пластами в разрезе донных отложений озер континентального происхождения. Гидродинамическая и гидрохимическая обстановка сложная и трудно поддается прогнозированию при эксплуатации. Прямая гидравлическая связь с озерной рапой обычно не существует или весьма слабая, но имеется связь с грунтовыми водами в береговых отложениях. Эксплуатационные запасы, как правило, небольшие и формируются за счет естественных запасов. Месторождения данного подтипа встречаются в озерных впадинах на юге Западной Сибири (оз. Малиновое и др.).

МЕСТОРОЖДЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Минеральные воды широко распространены в земной коре, своим формированием обязаны целому комплексу процессов и факторов (геохимических, биохимических, геологоструктурных, геотемпературных, гидродинамических и т. д.) и образуют месторождения различных типов.

Месторождения минеральных вод весьма многообразны и различаются по типу минеральной воды, положению в региональной гидрогеологической структуре, характеру коллекторов и залегания водоносных горизонтов, геологоструктурным и гидродинамическим условиям, механизму формирования состава минеральной воды.

Типизация месторождений минеральных вод в зависимости от целевого назначения может быть построена на основе каких-то отдельных признаков, или по их сочетанию. Например, выделялись группы месторождений углекислых, сероводородных и других типов вод, внутри которых подразделение велось по гидрохимическому или иному показателю.

По условиям формирования минеральных вод и составу растворенных в них газов А. М. Овчинников выделил четыре группы месторождений: 1) с газами окислительной обстановки; 2) с газами восстановительной обстановки; 3) с газами метаморфической обстановки; 4) радиоактивных вод.

В зависимости от геологоструктурных условий и механизма формирования минеральных вод месторождения делятся на региональные и локальные.

Поскольку конечной целью любых теоретических и методических исследований в области минеральных вод является выявление и освоение конкретных месторождений, типизация месторождений должна служить основой для разработки рациональных методов поисков, разведки и эксплуатации. Тем самым диктуется необходимость учета прежде всего показателей, определяющих объем и методику гидрогеологических исследований, которые обеспечат достоверные прогнозы при оценке эксплуатационных запасов минеральных вод месторождения. Объем буровых работ и методика опытных работ в наибольшей степени зависят от масштабов месторождения и условий формирования ресурсов минеральных вод.

Масштабы месторождения, формирование и локализация минеральных вод, динамика и восполнение их ресурсов определяются, с одной стороны, региональными гидрогеологическими условиями, с другой — геологоструктурными и гидродинамическими условиями самого месторождения. Тем самым решающее значение при типизации месторождений минеральных вод приобретают геологоструктурные и гидродинамические факторы. Совершенно очевидно, что геологоструктурные факторы в значительной степени обусловливают гидрогеологическую обстановку, прежде всего гидродинамическую: каждому типу структур свойственны определенные коллекторы (поровые, трещинные), условия их залегания (пластовые, трещинно-жильные), мощности и протяженность.

По гидродинамическим условиям и типу водовмещающей емкости все месторождения минеральных вод подразделяются на три большие группы: 1) месторождения водонапорных пластовых систем; 2) месторождения водонапорных жильных систем; 3) место-

рождения безнапорных водоносных трещинных или пластовых систем.

Внутри каждой из групп наблюдается также большое разнообразие месторождений по условиям фильтрации, восполнения ресурсов и механизму формирования химического и газового состава минеральных вод, определяющим гидрохимическую структуру месторождения и степень подвижности контуров кондиционных минеральных вод. В конечном счете этими факторами определяются объем и методика поисково-разведочных работ. Именно на учете структурно-гидродинамических условий и основных механизмов формирования основана типизация месторождений минеральных вод, впервые предложенная Г. С. Вартаняном в 1966 г., не претерпевшая по своей принципиальной сути изменений до настоящего времени, но получившая дальнейшее развитие в смысле ее углубления. Г. С. Вартанян выделил шесть основных типов месторождений: I — пластовые месторождения платформенных артезианских бассейнов; II — пластовые месторождения предгорных и межгорных артезианских бассейнов и склонов; III — месторождения трещинно-жильных водонапорных систем; IV — месторождения безнапорных трещинных и пластовых систем приповерхностной зоны (в бассейнах грунтовых вод); V — месторождения гидроинжекционного типа в артезианских бассейнах и склона; VI — месторождения гидроинжекционного типа в безнапорных водоносных системах приповерхностной зоны.

В качестве основы типизации использован не просто геолого-структурный принцип, а комплекс показателей, обусловливающих величину месторождений и условия формирования их ресурсов. Геологоструктурный принцип безусловно является основным, но в I—IV типах он опосредованно определяет условия питания и динамики подземных минеральных вод, специфические для каждого из типов, хотя и не входящие в их наименования. V и VI типы месторождений существенно отличаются от II и IV механизмом формирования ресурсов минеральных вод. Опыт разведки целого ряда месторождений Кавказа, Средней Азии, Дальнего Востока доказал правомерность выделения гидроинжекционных месторождений в самостоятельные типы, требующие специфического подхода при их исследовании.

Рассмотрим главные особенности выделенных типов месторождений.

I. Месторождения в платформенных артезианских бассейнах характеризуются выдержанными на обширных площадях пластовыми условиями фильтрации, спокойным залеганием и относительной однородностью фильтрационных свойств водоносных горизонтов, чаще всего неограниченных в плане, реже имеющих непроницаемые или полупроницаемые границы литолого-фациального характера. Тип коллекторов — пластово-поровый, пластово-трещинный, пластово-карстовый. Минеральные воды определенного состава имеют широкое площадное распространение и формируются в течение длительного геологического времени; скорости движе-

ния подземных вод очень низкие. Современные области инфильтрационного питания горизонтов обычно удалены на расстояния, исключающие их влияние на контуры минеральных вод; в вертикальном разрезе минеральные воды обычно также изолированы. Эксплуатационные запасы формируются преимущественно за счет упругих запасов. Основной метод их оценки — гидродинамический. Месторождения этого типа наиболее просты для исследований К ним относятся месторождения минеральных вод Московского артезианского бассейна (Москва, Кашино, Монино и др.), Западно-Сибирского (Тюмень) и др.

Месторождения этого типа могут существенно отличаться по глубинам залегания водоносных горизонтов, степени изолированности их в вертикальном разрезе, соотношению минеральных вод различного состава и некондиционных вод, величинам напоров и т. д. Эти различия дают основание выделить два подтипа. К первому относятся месторождения в центральной части платформенного бассейна, влияние границ которого практически исключено, химический состав минеральных вод однообразен и устойчив; ко второму подтипу относятся месторождения в краевой части бассейна, где возможно влияние границ и областей питания и гидрохимическая структура более сложная, вплоть до наличия контуров некондиционных вод.

II. Месторождения предгорных и межгорных бассейнов и склонов также имеют пластовый характер, но более сложное строение и меньшие размеры. Залегание водоносных горизонтов осложнено складками и разрывными нарушениями, в связи с чем они часто имеют геометрически сложные границы различного рода. Преобладающий тип коллекторов — пластово-трещинный, иногда пластово-поровый, пластово-карстовый. Фильтрационная неоднородность пластов обусловлена фациальной изменчивостью и тектонической нарушенностью. Минеральные воды весьма разнообразны по составу, в высокой степени газонасыщенны, воды одного типа имеют относительно небольшие площади развития, часто приурочены к определенным литолого-фациальным комплексам, внутри которых они и формируются. Характерен более активный водообмен, а вблизи бортов бассейнов — существенно влияние областей современного инфильтрационного питания. Гидравлическая связь между горизонтами с различным типом вод более вероятна, чем в месторождениях I типа, особенно в зонах разломов. Эксплуатационные запасы формируются в основном за счет упругих, иногда частично за счет естественных ресурсов. Преобладающий метод оценки — комбинированный. К таким месторождениям относятся: Махачкалинское, группа Майкопских, Нальчинское, Тбилисское.

Месторождения этой группы обусловлены в основном геолого-структурными особенностями, в соответствии с которыми выделяются три подтипа. Первый подтип — это месторождения, приуроченные к антиклиналям, второй — к синклиналям; третий — к краевым частям бассейнов и склонов. Выделенные подтипы отличаются глубинами залегания минеральных вод, структурой фильтра-

ционного и гидрохимического полей, характером газонасыщенности.

III. Месторождения трещинно-жильных водонапорных систем приурочены к массивам магматогенно-метаморфических пород, связаны обычно с тектоническими нарушениями, реже с карстом. Месторождения представляют собой ограниченного сечения водоносные зоны среди практически монолитных водонепроницаемых пород, обусловливающие наличие сосредоточенных потоков минеральных вод. Характеризуются анизотропией фильтрационных свойств и крайне сложными путями движения подземных вод: иногда месторождения состоят из нескольких мало связанных между собой блоков. Границы месторождений (между трещиноватыми и монолитными породами) могут быть четкими или постепенными. Формирование минеральных вод происходит в основном на пути движения их по зонам разломов от области питания к зоне разгрузки. Эксплуатационные запасы формируются в большинстве случаев за счет естественных ресурсов, иногда и упругих запасов. Основной метод их оценки — гидравлический. Геолого-гидрогеологические условия трещинно-жильных месторождений с точки зрения постановки поисково-разведочных работ сложные.

В зависимости от структуры и размеров месторождений, которые определяются генезисом трещиноватости, они подразделяются на следующие подтипы: 1) месторождения трещинных систем разрывных нарушений (нормальные сбросы; малоамплитудные и крупноамплитудные взбросы); 2) месторождения контактовых трещиноватых зон интрузивных, экструзивных и рудных тел (линейные дайки, силлы и жилы; кольцевые и конические дайки; экзоконтакты интрузий; рудные штоки и жилы; некки; сводовые части соляных диапиров). Характерные месторождения: Исти-Су, Белокуриха, Ак-Су, Кульдур, Талая.

IV. Месторождения безнапорных трещинных и пластовых систем приповерхностной зоны связаны с корой выветривания магматогенных и метаморфических пород и приповерхностной зоной осадочных отложений. Они локализуются на небольших участках, где водовмещающие породы содержат биологически активные компоненты (минеральные или органические), выщелачиваемые грунтовыми потоками. Химический состав и уровенный режим минеральных вод подвержены изменениям в зависимости от инфильтрационного питания и интенсивности отбора.

Месторождения в коре выветривания характеризуются анизотропией фильтрационных свойств. Эксплуатационные запасы ограничены, формируются в основном за счет естественных запасов. К этому типу относятся многие месторождения железистых, радоновых, сероводородных и содержащих органические компоненты вод. Наиболее известные представители этого типа месторождений: Марциальные воды, Увильды, Кемери, Нафтуся, Кисегач. Месторождения подразделяются по типу коллекторов: 1) месторождения в коре выветривания кристаллических пород с трещин-

ными коллекторами; 2) месторождения в осадочных отложениях с поровыми коллекторами.

V. Месторождения гидроинжекционного типа в артезианских бассейнах и склонах связаны с зонами разгрузки глубинных минеральных вод в горизонты пластовых напорных вод. Характеризуются крайне сложными гидрогеологическими условиями, а их гидродинамическая и гидрохимическая структуры зависят от соотношения гидродинамических параметров двух систем: пластовой и трещинно-жильной, связанной с активным тектоническим нарушением, а чаще всего пересечением разнонаправленных нарушений. Для них характерны сильная неоднородность и анизотропия фильтрационных свойств, наличие геометрически сложных границ различного рода в плане. Минеральные воды определенного типа имеют ограниченные площади развития, образуя гидродинамический (а также гидрохимический и геотемпературный) купол в пластовой системе. Купол имеет сложные очертания и охватывает обычно несколько водоносных горизонтов, т. е. чаще всего минеральные воды не приурочены к какому-либо определенному горизонту. Границы и объем купола минеральных вод зависят от водоотбора из системы (из любого горизонта). Минеральные воды обладают высокими газонасыщенностью, температурой и напорами. Гидродинамический режим — упруго-водонапорный, эксплуатационные запасы месторождений формируются за счет упругих запасов и естественных ресурсов при различных их соотношениях с преобладанием упругих. Достоверное изучение гидроинжекционных месторождений возможно при проведении большого объема работ и применения специальных методов исследований. Метод оценки запасов — преимущественно гидравлический с учетом, где это необходимо, неустановившегося движения. Такой тип месторождений широко распространен в межгорных и наложенных бассейнах складчатых областей и характерен для углекислых вод и азотных терм. Характерные месторождения: Нагуты, Ессентуки, Пятигорск (соляно-щелочных вод), Боржоми, Аршан, Джалалабад, Чимион. Подтипы месторождений аналогичны подтипам месторождений II типа.

VI. Месторождения гидроинжекционного типа в безнапорных водоносных системах приповерхностной зоны связаны с разгрузкой минеральных вод из трещинно-жильных водонапорных систем в потоки грунтовых вод. Основные особенности их аналогичны предыдущему типу. Отличия заключаются в следующем: для месторождений в грунтовых потоках характерно более быстрое падение напора и температур по мере удаления от зоны разгрузки минеральных вод; неустойчивость химического состава более значительная и зависит от интенсивности водоотбора и величины инфильтрационного питания. Гидродинамический режим — гравитационно-водонапорный. Эксплуатационные запасы формируются преимущественно за счет естественных ресурсов минеральной воды. Метод оценки запасов обычно гидравлический. Характерные месторождения: Дарасун, Кука, Шмаковка, Ургучан, Бжни. Под-

типы месторождений аналогичны подтипам месторождения IV типа.

Выделение типов месторождений осуществляется исходя из макропоказателей, характерных для больших групп месторождений и играющих доминирующую роль при выборе объемов и методики поисково-разведочных работ. Месторождения внутри группы, как видно даже из приведенного краткого описания, могут быть весьма разнообразны по гидрогеологическим условиям. Большая часть этих особенностей выявляется в процессе поисково-разведочных работ (на различных его стадиях) и определяет конкретный комплекс исследований и методику отдельных их видов. Следует иметь в виду, что выделение типов месторождений в какой-то мере условно, так как в природе возможно наличие переходных типов, либо сопряжение двух различных типов.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОД

Для поисков, разведки, оценки запасов и народнохозяйственного использования теплоэнергетических вод целесообразно выделение двух типов гидрогеотермальных систем, к которым приурочены месторождения природных теплоносителей — пластового и трещинного (трещинно-жильного). При этом под геотермальными системами понимается часть земной коры, в пределах которой формируются термальные воды, пригодные для практического теплоэнергетического использования.

По геолого-гидрогеологическим и геотермическим условиям, определяющим масштабы месторождения, методику проведения поисково-разведочных работ и оценку эксплуатационных запасов, месторождения теплоэнергетических вод подразделяются на три основных типа: 1) месторождения пластового типа в артезианских бассейнах платформ и плит; 2) месторождения пластового типа в артезианских бассейнах, приуроченных к предгорным и межгорным впадинам горно-складчатых областей; 3) месторождения трещинно-жильного типа горноскладчатых областей.

По данным региональной оценки эксплуатационных запасов теплоэнергетических вод СССР, большинство запасов (более 90 %) приходится на месторождения первых двух типов, т. е. на месторождения, приуроченные к гидрогеотермальным системам пластового типа.

Месторождения первого типа приурочены к крупным артезианским бассейнам платформ и плит, сложенным мезозойскими и кайнозойскими отложениями, и связаны обычно с водоносными комплексами (горизонтами), залегающими на глубинах более 1000—1500 м.

В артезианских бассейнах древних платформ, выполненных палеозойскими отложениями, термальные воды, как правило, не имеют практического значения для теплоэнергетического использования вследствие низких фильтрационных свойств водовмещающих пород, невысоких температур и высокой минерализации вод.

По характеру водовмещающих отложений водоносные комплексы (горизонты) месторождений рассматриваемого типа подразделяются на поровые, порово-трещинные и трещинно-карстовые. Наиболее широко развиты и представляют практический интерес горизонты с поровым и порово-трещинным типом циркуляции термальных вод, приуроченных в основном к терригенным и терригенно-карбонатным коллекторам (пески, песчаники, мергели, известняки). Трещинно-карстовые зоны, связанные с карстовыми коллекторами (известняки, доломиты, гипсоносные породы), встречаются редко и чаще всего имеют локальное распространение.

По количеству продуктивных горизонтов месторождения могут быть одно- и многопластовыми. Они характеризуются, как правило, большими размерами, сравнительно спокойным залеганием продуктивных комплексов (горизонтов), относительной однородностью фильтрационных свойств, выдержанностью на больших площадях гидрогеохимических и геотермических показателей, высокими гидростатическими напорами вод, значительными величинами эксплуатационных запасов. Примерами месторождений первого типа могут служить Тобольское в Западно-Сибирском артезианском бассейне, Кизлярское в Восточно-Предкавказском артезианском бассейне.

Выбор эксплуатационных участков в пределах этих месторождений обусловлен технико-экономическими показателями, с учетом расположения основных потребителей.

Эксплуатационные запасы месторождений этого типа формируются главным образом за счет упругих запасов вод эксплуатируемых водоносных комплексов (горизонтов). Перетекание из соседних горизонтов и отжатие из глинистых прослоев отсутствует или имеет подчиненное значение.

Месторождения второго типа приурочены к глубоким частям разреза малых и средних артезианских бассейнов предгорных и межгорных впадин, выполненных мезозойскими и кайнозойскими отложениями. Они отличаются более сложным строением и меньшими размерами по сравнению с месторождениями первого типа и могут быть одно- и многопластовыми. Для наиболее сложно построенных месторождений этого типа характерны сложная геолого-структурная обстановка с наличием крутых складок, разрывных тектонических нарушений (разломы, надвиги и т. д.). В связи с этим глубины залегания продуктивных комплексов (горизонтов) на сравнительно небольших расстояниях могут меняться в широких пределах. Для этих месторождений характерна, как правило, фациальная изменчивость водовмещающих пород, приводящая часто к существенному изменению фильтрационных свойств пород на небольших расстояниях. Сочетание перечисленных факторов определяет сложность гидродинамических и геотермических условий месторождений рассматриваемого типа, а также изменчивость минерализации и состава вод. Тектоническими нарушениями месторождение может быть разделено на ряд блоков, либо гидравлически связанных, либо изолированных друг от друга. Выбор экс-

плуатационных участков контролируется главным образом структурным планом месторождения, а также сочетанием комплекса гидродинамических, гидрохимических и геотермических показателей.

По условиям формирования эксплуатационных запасов подземных теплоэнергетических вод среди месторождений второго типа могут быть выделены три разновидности: месторождения, эксплуатационные запасы которых формируются почти исключительно за счет упругих запасов вод эксплуатируемого горизонта; роль других источников пренебрежимо мала (Зугдиди); месторождения, в формировании эксплуатационных запасов которых заметную роль играют перетекание из других горизонтов и отжатие из глинистых прослоев (Ташкентское, Ханкальское, Махачкалинское); месторождения, среди источников формирования эксплуатационных запасов которых определенную роль играет сокращение естественной разгрузки термальных вод, проявляющегося большей частью в виде выходящих по разломам источников (Ханкальское, Грозненское).

Для месторождений второго типа в большинстве случаев характерны поровые и порово-трещинные коллекторы, хотя не исключена встреча отдельных карстово-трещинных зон.

Теплоэнергетические воды месторождений первых двух типов по температуре относятся к низко- и среднепотенциальным, температура на устье скважин, вскрывших эти воды, обычно ниже 100 °С, минерализация вод может быть различной — от 1 г/л до 100 г/л и более.

Месторождения теплоэнергетических вод трещинно-жильного типа горноскладчатых областей распространены в районах современного и недавнего вулканизма (Камчатка и Курильские острова), и районах неотектонической активизации в разновозрастных складчатых областях. Они приурочены обычно к интрузивным, метаморфическим и вулканогенно-осадочным комплексам пород и связаны с системами крупных тектонических нарушений, формирующих зоны дробления и интенсивной трещиноватости, развитые на фоне слаботрещиноватых пород, и обусловливающих блоковую структуру месторождений. Эти месторождения отличаются очень сложным строением и имеют локальное распространение.

Размеры месторождений, расположенных в складчатых районах вне областей современного вулканизма, не превышают обычно 1 км^2; в областях современного вулканизма они достигают нескольких десятков квадратных километров (на известных разведанных месторождениях — до 50 км^2).

В пределах рассматриваемых месторождений водоносные трещинные зоны имеют неравномерную раскрытость и часто — ограниченную протяженность. Пористость и проницаемость монолитных блоков пород, как правило, ничтожны, фильтрация вод происходит главным образом по системам взаимно пересекающихся трещин, с различной проводимостью, что обусловливает чрезвычайно сложные пути движения термальных вод и вследствие это-

го — фильтрационную и геотермическую неоднородность месторождений. Для большинства месторождений рассматриваемого типа характерно наличие очагов разгрузки в виде поверхностных термопроявлений (термальных источников, парогазовых струй, грязевых котлов, прогретых площадок), которые обычно трассируют линии основных тектонических нарушений.

Эксплуатационные запасы теплоэнергетических вод рассматриваемых месторождений формируются главным образом за счет естественных ресурсов. Минерализация вод редко превышает 5—10 г/л. По температуре теплоэнергетические воды месторождений, расположенных в складчатых районах вне областей современного и недавнего вулканизма, относятся к низко- и среднепотенциальным (до 100 °С).

В районах современного вулканизма распространены месторождения с низко- и среднепотенциальным теплоносителем (до 100 °С) и высокопотенциальные (с температурой теплоносителя выше 100 °С), называемые парогидротермами.

Для целей разведки и оценки запасов месторождения теплоэнергетических вод в районах современного вулканизма целесообразно классифицировать в зависимости от температуры и физического состояния теплоносителя, определяющего теплоэнергетическую мощность месторождений и основные направления их использования. Исходя из указанных показателей (температуры и физического состояния теплоносителя) среди месторождений вулканических областей можно выделить четыре группы:

— месторождения горячих вод — с температурой в пластовых условиях до 100 °С, теплоноситель и в пласте, и на поверхности представлен водой; теплоэнергетическая мощность этих месторождений сравнительно невелика (до 210 гДж/ч); используются для теплоснабжения;

— месторождения перегретых вод — с температурой выше 100 °С; теплоноситель в пластовых условиях представлен водой, скважинами на поверхность выводится пароводяная смесь (ПВС), или влажный пар, с различным соотношением воды и пара. В этой группе можно выделить 2 подгруппы: 1) слабоперегретых вод — с температурой 100—150 °С; содержание пара в пароводяной смеси не превышает 10 %, энтальпия ПВС не более 714 кДж/кг; использование этих месторождений для выработки электроэнергии экономически нецелесообразно; 2) перегретых вод с температурой выше 150 °С (максимальная температура на разведанных месторождениях 390 °С) — содержание пара в ПВС составляет более 15 % (в среднем 15—30 %), энтальпия теплоносителя варьирует в пределах 756—1470 кДж/кг; теплоэнергетическая мощность этих месторождений может достигать нескольких сот гигаджоулей в час; используются для выработки электроэнергии;

— месторождения перегретых вод с паровой шапкой — с температурой более 200 °С. В пределах месторождения выделяется две зоны с различным фазовым состоянием теплоносителя в пластовых условиях: 1) зона перегретых вод, где теплоноситель в плас-

товых условиях представлен водой, на поверхность выводится ПВС с содержанием пара 20—45 % и энтальпией 1176—1680 кДж/кг; 2) зона паровой шапки — в пластовых условиях преобладает паровая фаза, скважинами на поверхность выводится сухой насыщенный или слегка влажный пар (с небольшим процентом влажности — порядка 10—20 %) с энтальпией 2100—2730 кДж/кг; теплоэнергетическая мощность месторождений примерно того же порядка, что и для предыдущей группы, используют в теплоэнергетике;

— месторождения пара — в пластовых условиях преобладает паровая фаза, количество подвижной (свободной) воды в резервуаре не превышает 10 %, на поверхность выводится сухой насыщенный или перегретый пар с энтальпией 2730—2940 кДж/кг. Резервуары с преобладанием пара характеризуются первоначально (до эксплуатации) довольно однообразными температурами и давлениями: температура колеблется около 240 °С, давление — около 3,2 МПа. Эти месторождения обладают наибольшей энергетической мощностью, которая может достигать нескольких тысяч гигаджоулей в час, и используются для выработки электроэнергии, но они сравнительно редко встречаются в природе: по данным Д. Уайта, на 100 геотермальных «водных» систем приходится всего лишь 3—5 систем с преобладанием пара.

По геологоструктурным и геоморфологическим особенностям, по составу водовмещающих пород и условиям разгрузки среди месторождений трещинно-жильного типа можно выделить следующие виды:

— месторождения древних складчатых областей, испытавших интенсивное воздействие неотектонических движений. Месторождения сложены кристаллическими породами, обнажающимися на поверхности; выходы термальных вод приурочены непосредственно к тектоническим трещинам или системам трещин (Кульдурское, Иссык-Атинское, Тальское);

— месторождения контактного типа, в пределах которых по тектоническому нарушению (или системе нарушений) контактируют изверженные породы с метаморфическими, либо изверженные или метаморфические с осадочными; тектоническая структура месторождений часто бывает затушевана чехлом рыхлых осадков четвертичного возраста (Питательское);

— долинные месторождения теплоэнергетических вод, приуроченные к древним кристаллическим или сравнительно молодым вулканогенно-осадочным породам, прикрытым чехлом рыхлых аллювиальных четвертичных осадков различной мощности (до 200 м), которые затушевывают сложную тектоническую структуру месторождения. Разгрузка термальных вод происходит здесь в виде рассредоточенных струй, выходящих из-под рыхлых наносов. Этот вид месторождений встречается наиболее часто в областях альпийской складчатости, современного вулканизма и в древних складчатых системах, омоложенных неотектоническими движениями (Паратунское месторождение на Камчатке);

— месторождения вулканических построек, связанные как с региональными разломами и разломными зонами, так и с радиально-кольцевыми нарушениями вулканов. Структура этих месторождений часто бывает затушевана панцырем лавовых покровов или делювиальных отложений различной мощности, через которые происходит разгрузка термальных вод и парогидротерм со значительным смещением центров этой разгрузки (Нижне-Кошелевское месторождение на Камчатке);

— прибрежно-морские месторождения теплоэнергетических вод (береговые термы, по В. И. Кононову), сложенные вулканогенно-осадочными и кристаллическими породами, рассеченными сложной системой тектонических нарушений и прикрытыми рыхлым чехлом осадков морских террас и делювия. Разгрузка термальных вод этих месторождений тяготеет главным образом к прибрежной полосе (месторождение Горячий Пляж на о-ве Кунашир, Чаплинское в Чукотско-Катазиатском вулканогенном поясе).

Глава 7

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

СТАДИЙНОСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из важнейших принципов разведки месторождений полезных ископаемых в нашей стране является принцип стадийности. Применение этого принципа предотвращает вовлечение в детальную разведку малоперспективных месторождений, необоснованное расходование государственных средств, позволяет осуществлять своевременный контроль и управление разведкой в масштабах как отдельных отраслей, так и страны в целом. Принцип стадийности в полной мере относится и к разведке месторождений глубоких подземных вод — минеральных, теплоэнергетических и промышленных. Подразделение разведочного процесса на стадии и требования к каждой стадии применительно к подземным водам определяются приказом Министерства геологии СССР, который обязателен для исполнения всеми организациями, осуществляющими геологоразведочные работы на подземные воды независимо от ведомственной подчиненности. Разведка минеральных и теплоэнергетических вод в нашей стране помимо Мингео СССР производится организациями системы Минздрава СССР и Мингазпрома.

В полном объеме разведочный процесс месторождений подземных вод включает следующие стадии: гидрогеологическая съемка, поиски, предварительная разведка, детальная разведка, эксплуатационная разведка. Отдельные стадии могут исключаться или объединяться. Так, например, для большинства месторождений глубоких подземных вод, связанных с артезианскими бассей-

нами, проведение гидрогеологической съемки нецелесообразно. Выполнение съемки имеет смысл лишь в горноскладчатых областях. Рассмотрим кратко задачи и содержание работ на каждой стадии.

Поисковая стадия подразделяется на подстадии общих и детальных поисков. При общих поисках производится оценка перспектив на все типы или определенные типы вод крупных гидрогеологических регионов или их частей. В результате проведения работ выделяются перспективные водоносные комплексы, определяются положение их в плане и разрезе, устанавливается приближенно состав вод и растворенных газов, определяются благоприятные участки для постановки более детальных разведочных работ. При возможности производится региональная оценка прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов. Общие поиски базируются на целенаправленном анализе региональных геолого-геофизических гидрогеологических материалов. В связи с этим основными видами работ являются сбор и анализ имеющейся геологической, геофизической и гидрогеологической информации, полученной при проведении площадных геофизических работ, бурении и опробовании скважин различного назначения, эксплуатации действующих водозаборов, изучении режима подземных вод и др. В необходимых случаях проводится ревизионное обследование и опробование существующих скважин и естественных водопроявлений.

Подстадия детальных поисков проводится на месторождениях 3-й и реже 2-й группы сложности, т. е. в горноскладчатых районах или в предгорных и межгорных впадинах со сложной тектоникой. Эта подстадия является важным этапом в разведке минеральных и теплоэнергетических вод и нередко она может служить основанием для перехода к детальной разведке. Задачей детальных поисков является выявление и оконтуривание месторождений или участков, перспективных для постановки разведочных работ.

При детальных поисках выполняется большой комплекс работ и исследований: крупномасштабные геолого-гидрогеологические съемки, специализированные съемки и исследования — геофизические, гидрогазохимические, термометрические, дистанционные инфра-, аэро-, космосъемки, бурение и опробование поисковых скважин, наблюдения за режимом источников и действующих водозаборов и некоторые другие.

В результате выполненных работ производится оценка эксплуатационных запасов по категориям C_1 и C_2. Для месторождений теплоэнергетических и промышленных вод разрабатывается ориентировочное ТЭО. Принимаются принципиальные решения по сбросу отработанных вод.

Предварительная разведка является основной стадией в разведке всех крупных месторождений, так как на этой стадии принимается решение о народнохозяйственной целесообразности освоения месторождения и вовлечения его в детальную разведку. Задачей предварительной разведки является изучение основных геолого-гидрогеологических особенностей месторождения — геолого-

структурных, фильтрационных, гидродинамических, гидрогеохимических, гидрогеотермических, установление источников формирования ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод.

Виды и содержание работ зависят от типа и группы сложности месторождений. На месторождениях 1 и в некоторых случаях 2 группы основными видами работ являются бурение и опробование откачкой гидрогеологических скважин, каротажные работы, лабораторные исследования образцов керна, воды и газа. В отдельных случаях выполняются наземные геофизические исследования. На месторождениях 3 и иногда 2 группы осуществляется более сложный комплекс работ: крупномасштабные гидрогеологические съемки, наземные геофизические работы (площадные и профильные); специализированные съемки и исследования (гидрохимическая, газовая, эманационная, термометрическая съемки и др.); бурение разведочных скважин с выполнением в них каротажных исследований, опробования опытными откачками; изотопные, глубинные гидрохимические исследования, лабораторные исследования, наблюдения за режимом подземных вод естественных водопроявлений и на действующих водозаборах. Как правило, по результатам предварительной разведки выбираются участки под проектные водозаборы, обосновывается их рациональная конструкция, производится оценка эксплуатационных запасов по категориям C_1 и C_2 (иногда В), для теплоэнергетических и промышленных вод разрабатываются технологическая схема или регламент и временные кондиции, предварительно прорабатываются и согласовываются варианты сброса отработанных вод. Предварительная разведка глубоких подземных вод выполняется при наличии заявок на воду, оформленных в соответствии с существующим законодательством. Основанием для разведки промышленных вод может служить решение директивных органов.

Детальная разведка может проводиться на новых месторождениях и в пределах уже эксплуатируемых месторождений. На новых месторождениях детальная разведка ставится в тех случаях, когда по результатам предыдущих стадий получена положительная геолого-экономическая оценка и отраслью намечается освоение месторождений в ближайшие 5—10 лет. Для минеральных вод детальная разведка проводится по заявкам, содержащим требования к качеству, режиму и условиям эксплуатации. Детальная разведка проводится на участках, согласованных с землепользователями, потребителями, территориальными управлениями и объединениями геологии с органами санитарного и рыбного надзора и др. Для проведения разведочных работ оформляется временный отвод земли.

На стадии детальной разведки уточняются природная модель и расчетная схема месторождения, определяются и принимаются расчетные значения гидрогеологических параметров, показатели качества вод и др. Виды и содержание работ принципиально не отличаются от таковых на предварительной стадии разведки. Однако на месторождениях 1 и 2 группы изучаются, как правило,

продуктивные водоносные комплексы, а на месторождениях 3 группы основным видом работ служит длительный опытно-эксплуатационный выпуск, сопровождаемый комплексом лабораторных исследований и режимных наблюдений.

Детальная разведка на эксплуатируемых месторождениях проводится с целью переоценки эксплуатационных запасов для перевода запасов из низких категорий в более высокие или в случаях изменения (неподтверждения) запасов более чем на 20 %, реконструкции водозабора за счет прироста запасов на флангах месторождения или доразведки неэксплуатируемых горизонтов, перевода неутвержденных запасов в промышленные в пределах горного отвода или на участках, где утверждение запасов вообще не проводилось. Основным видом работ являются сбор и анализ данных по эксплуатации месторождения (изменение дебитов, уровней, качества воды). Дополнительные разведочные работы по видам и содержанию не отличаются от разведки новых месторождений, но объемы их значительно меньше.

По результатам детальной разведки месторождений минеральных вод составляется отчет с подсчетом запасов. Для месторождений теплоэнергетических и промышленных вод разрабатываются ТЭО постоянных кондиций и кондиции, которые утверждаются в установленном порядке. На основании кондиций выполняется подсчет эксплуатационных запасов этих вод. Для месторождений промышленных вод кондиции и эксплуатационные запасы утверждаются ГКЗ СССР, для месторождений теплоэнергетических и минеральных вод — ГКЗ СССР и ТКЗ. В случаях детальной разведки в пределах действующих водозаборов могут разрабатываться новые кондиции для подсчета (пересчета) запасов или запасы могут подсчитываться и утверждаться применительно к действующему потребителю. Отчеты по детальной разведке служат обоснованием проектов строительства или реконструкции водозаборов.

Эксплуатационная разведка проводится на месторождениях (участках) с утвержденными запасами в процессе строительства и эксплуатации водозаборов с целью установления соответствия данных эксплуатации прогнозным расчетам, переоценки запасов по результатам эксплуатации, уточнения режима эксплуатации и др. Основными видами работ являются: организация и проведение режимных наблюдений за дебитами, уровнями и качеством воды по всем эксплуатационным и наблюдательным скважинам, обобщение и анализ материалов многолетней эксплуатации. Эксплуатационная разведка выполняется геологической службой, эксплуатирующих организаций, либо для проведения ее привлекаются специализированные организации. По результатам эксплуатационной разведки уточняются эксплуатационные запасы, корректируются способ и режим эксплуатации, обосновывается целесообразность доразведки месторождения. В необходимых случаях пересматриваются кондиции и запасы и переутверждаются в установленном порядке; проводится реконструкция водозабора.

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБОКИХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

Оценка эксплуатационных запасов глубоких подземных вод пластовых водонапорных систем в большинстве случаев производится путем гидродинамических расчетов, или так называемым гидродинамическим методом. Этот метод заключается в определении дебитов и динамических уровней подземных вод в течение расчетного срока эксплуатации водозаборов; для промышленных подземных вод, добыча которых обеспечивает работу производственных предприятий и выпуск определенного объема продукции, оценка эксплуатационных запасов обычно сводится к определению дебита водозабора при заданном допустимом понижении динамического уровня от поверхности земли, или к расчетам понижения уровней в период эксплуатации при заданном дебите водозабора.

Для оценки эксплуатационных запасов этим методом необходимо достаточно точно знать параметры, характеризующие подземные промышленные воды и вмещающие их породы. К числу основных расчетных гидрогеологических параметров относятся: мощность водоносных пород; фильтрационные свойства пород (коэффициенты фильтрации и проницаемости, водопроводимость); пьезопроводность (уровнепроводность) пород; упругие свойства водоносных горизонтов, сжимаемость вод и пород; температура подземных вод; минерализация, плотность, объемная масса и вязкость подземных вод.

Проницаемость характеризует способность породы пропускать сквозь себя жидкость или газ под действием давления. Впервые этот параметр был предложен Дарси в 1856 г.; в современном виде закон Дарси выражается следующим образом:

$$Q = F \frac{k_п}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx},$$

где Q — расход жидкости; F — площадь сечения потока; $k_п$ — коэффициент проницаемости; μ — вязкость жидкости; dP/dx — градиент давления.

Проницаемость характеризует только свойства пористой среды и не зависит от свойств фильтрующихся жидкостей; измерение ее производится обычно в лабораторных условиях на фильтрационных приборах. Для определения проницаемости образцов пород используют воду, керосин или газ. Нередко значения проницаемости одних и тех же образцов пород, полученные разными методами, существенно отличаются, причем газовая проницаемость оказывается как правило выше жидкостной. Это явление связывается с факторами, обусловленными сложным физико-химическим взаимодействием фильтрующихся жидкостей со скелетами горных пород, причем далеко не всегда представляется возможным однозначно выявить и объяснить факторы такого взаимодействия, и тем более дать количественную оценку их воздействия на точность лабораторных экспериментов. В связи с этим предпочтение обыч-

но отдается значениям проницаемости пород, определяемым по результатам опытных гидрогеологических исследований, хотя лабораторные определения этого параметра широко используются для характеристики разреза водоносных пород, определения мест притока воды в скважины и т. д.

Коэффициент фильтрации k, в отличие от коэффициента проницаемости, характеризует свойства водопроводящих пород в зависимости от свойств фильтрующихся жидкостей. Он имеет размерность скорости и численно выражает расход потока пластовой жидкости через единицу площади его живого сечения при уклоне пьезометрической поверхности, равном единице. Связь коэффициентов фильтрации и проницаемости выражается соотношением

$$k = 864 \frac{k_{\text{п}} \gamma_{\text{в}}}{\mu},$$

где $\gamma_{\text{в}}$ — плотность воды.

Существует большое количество методов определения k по действующему диаметру и пористости пород, однако ни один из них не обеспечивает достаточной точности оценки этого параметра. Поэтому основными и наиболее достоверными являются методы определения коэффициента фильтрации по данным опытных откачек из скважин.

Коэффициент пьезопроводности a характеризует скорость перераспределения давления в пласте по площади под влиянием первоначального его изменения. Этот параметр является комплексным показателем, зависящим от фильтрационных и упругих свойств водоносных горизонтов. Он определяется по формуле

$$a = \frac{k_{\text{п}}}{\mu \beta^*} = \frac{k}{\gamma \beta^*},$$

где β^* — коэффициент упругоемкости. Пьезопроводность наиболее точно определяется по данным откачек из скважин.

Коэффициент упругоемкости β^* физически показывает, какое количество жидкости может высвободиться из единицы объема пласта при снижении в нем давления на единицу давления. Упругоемкость зависит таким образом от пористости породы, сжимаемости породы и жидкости:

$$\beta^* = n(\beta_{\text{п}} + \beta_{\text{ж}})$$

или

$$\beta^* = \beta_{\text{с}} + n\beta_{\text{ж}},$$

где n — пористость породы; $\beta_{\text{п}}$ — сжимаемость водонасыщенной породы; $\beta_{\text{ж}}$ — сжимаемость пластовой жидкости; $\beta_{\text{с}}$ — сжимаемость скелета породы.

Коэффициент упругого сжатия β, или сжимаемость, характеризует способность вещества изменять свой объем под влиянием приложенного давления. Для определения коэффициента упругого сжатия используются приборы типа стабилометра, позво-

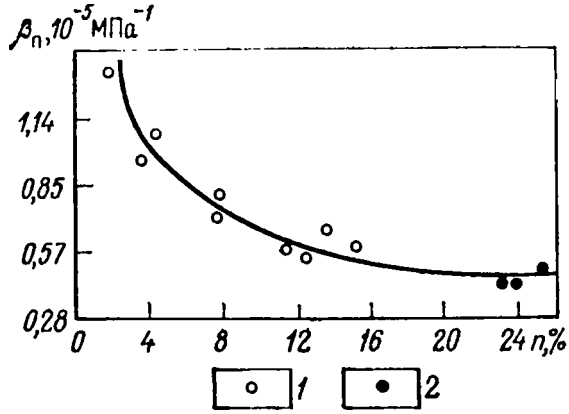


Рис. 24. График зависимости $\beta_п$ от пористости пласта *п. По Р. Холлу*
1 — известняки, *2* — песчаники

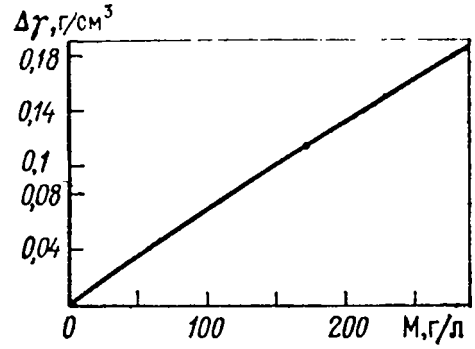


Рис. 25. График зависимости между разностью плотностей дистиллированных и минерализованных вод и их минерализацией

ляющие осуществлять всестороннее сжатие образца породы или воды. Наиболее часто встречающиеся значения этих коэффициентов для пластовых вод $\beta_ж = 2—7 \cdot 10^{-6}$ м^2/т; для пород $\beta_с = 0{,}7—1{,}5 \cdot 10^{-6}$ м^2/т.

Коэффициенты упругого сжатия могут быть с достаточной для практических целей точностью получены расчетным путем. Коэффициент упругого сжатия породы, как показали эксперименты, зависит в основном от ее пористости, и весьма незначительно — от состава зерен породы. Коэффициент упругого сжатия пор $\beta_п$ может быть определен по графику Холла (рис. 24), а коэффициент упругого сжатия породы определяется по формуле:

$$\beta_с = \beta_п n.$$

Для приближенных расчетов при $n = 0{,}15—0{,}25$ можно принимать $\beta_с = 1 \cdot 10^{-4}$ МПа$^{-1}$ $= 1 \cdot 10^{-6}$ м^2/т.

Коэффициент упругого сжатия жидкости зависит от минерализации, объемной массы, газонасыщенности, температуры и давления. Для пластовой воды коэффициент сжимаемости с достаточной для практических целей точностью определяется по эмпирической формуле Мамуны с учетом формулы Додсона—Стендинга, учитывающей влияние растворенного газа:

$$\beta_ж = (1 \div 0{,}05 V_0)\left(\beta_0 - 7{,}16 \cdot 10^{-3} \frac{M}{\gamma}\right),$$

где β_0 — коэффициент сжимаемости чистой воды (обычно принимаемый равным $4{,}2 \cdot 10^{-6}$ м^2/т); M — минерализация воды; V_0 — газовый фактор.

Плотность пластовой воды играет существенную роль при региональном изучении гидрогеодинамики. Не менее важное значение имеет учет плотности пластовых вод при определении расчетных гидрогеологических параметров. Это связано с тем, что плотность воды заметно изменяется в зависимости от минерализации, температуры и давления. Возможные погрешности в опреде-

лении параметров без учета этих факторов будут тем больше, чем глубже от поверхности залегает водоносный горизонт, чем больше разница пластовых и устьевых температур воды и чем больше минерализация последней. Необходимость в определении пластовой плотности подземных вод возникает в случае, если нужно оценить изменение этого параметра по стволу скважин, и когда производится прогноз изменения объемной массы воды в пластовых условиях на площади распространения водоносного горизонта и т. д. Плотность воды необходимо определять также при расчетах величин k, $k_п$, $\beta_ж$ и a.

Разность $\Delta\gamma$ между плотностями минерализованных и дистиллированных вод и их минерализацией показана на рис. 25. Известно также, что с повышением температуры (выше 0 °С) плотность воды уменьшается (табл. 57). Используя данные табл. 57, Л. В. Боревский [16] аппроксимировал изменение плотности дистиллированной воды в интервале температур до 200 °С в виде уравнений:

$$\gamma_{(t)} = 1 - 5{,}9 \cdot 10^{-6} (t - 4)^{1{,}95} \text{ при } t \leqslant 10\,°\text{C}; \quad (17)$$

$$\gamma(t) = 0{,}9584 - 3{,}37 \cdot 10^{-4} (t - 100)^{1{,}22} \text{ при } 100\,°\text{C} \leqslant t \leqslant 200\,°\text{C}. \quad (18)$$

Как указывает Л. В. Боревский, погрешность в расчетах $\gamma(t)$ по формулам (17) и (18) относительно их фактических значений не превышает 0,16 %, что вполне допустимо в практических расчетах. При заданной минерализации для любых температур добавки $\Delta\gamma$ к плотности дистиллированной воды составляют почти постоянную величину.

Оценка фильтрационных свойств пород требует учета и определения вязкости фильтрующихся подземных вод. Вязкость дистиллированной воды равна 1 Па·с при атмосферном давлении и комнатной температуре. Увеличение минерализации ведет к значительному увеличению вязкости жидкости; рост температуры приводит к уменьшению вязкости почти в одинаковой степени для вод разной минерализации. Зависимость вязкости от минерализации и температуры подземных вод показана на рис. 26.

Под эффективной мощностью понимается общая суммарная мощность продуктивных пластов водоносного горизонта или комплекса, которые обеспечивают приток подземных вод в скважину. Вследствие отбора небольших объемов керна из бурящихся глубоких скважин и небольшого процента его выноса литолого-стратиграфическое расчленение вскрываемых отложений и определение мощности промышленной водоносной зоны осуществляется главным образом по данным промыслово-геофизических исследований, в частности стандартного электрического каротажа, боковых каротажных зондирований (БКЗ), радиоактивного каротажа, резистивиметрии, инклинометрии, термометрии и т. д. При определении эффективной мощности водоносных пород целесообразно строить схемы корреляции разрезов скважин в интервалах залегания промышленных подземных вод. Такие схемы дают представление о характере изменения мощности, выдержанности или

Таблица 57

Относительная масса и удельный объем воды при различных температурах

Температура, °С	Относительная масса	Удельный объем	Температура, °С	Относительная масса	Удельный объем
—10	0,99815	1,10180	25	0,99707	1,00294
—9	0,99843	1,00157	26	0,99681	1,00320
—8	0,99869	1,00131	27	0,99654	1,00347
—7	0,99892	1,00108	28	0,99626	1,00375
—6	0,99912	1,00088	29	0,99597	1,00405
—5	0,99930	1,00070	30	0,99567	1,00435
—4	0,99945	1,00055	35	0,99406	1,00598
—3	0,99958	1,00042	40	0,99224	1,00782
—2	0,99970	1,00031	45	0,99024	1,00985
—1	0,99979	1,00021	50	0,98807	1,01207
0	0,99987	1,00013	55	0,98573	1,01448
1	0,99993	1,00007	60	0,98324	1,01705
2	0,99997	1,00003	65	0,98059	1,01979
3	0,99999	1,00001	70	0,97781	1,02270
4	1,00000	1,00000	75	0,97489	1,02576
5	0,99999	1,00001	80	0,97183	1,02899
6	0,99997	1,00003	85	0,96865	1,03237
7	0,99993	1,00007	90	0,96543	1,03599
8	0,99988	1,00012	95	0,96192	1,03959
9	0,99981	1,00019	100	0,95838	1,04343
10	0,99973	1,00027	110	0,9510	1,0515
11	0,99963	1,00037	120	0,9434	1,0601
12	0,99952	1,00048	130	0,9352	1,0693
13	0,99940	1,00060	140	0,9264	1,0794
14	0,99927	1,00073	150	0,9173	1,0902
15	0,99913	1,00087	160	0,9075	1,1019
16	0,99897	1,00103	170	0,8973	1,1145
17	0,99880	1,00120	180	0,8866	1,1279
18	0,99862	1,00138	190	0,8750	1,1429
19	0,99843	1,00157	200	0,8649	1,1563
20	0,99823	1,00177	210	0,850	1,177
21	0,99802	1,00198	220	0,837	1,195
22	0,99780	1,00221	230	0,823	1,215
23	0,99756	1,00244	240	0,809	1,236
24	0,99732	1,00268	250	0,799	1,251

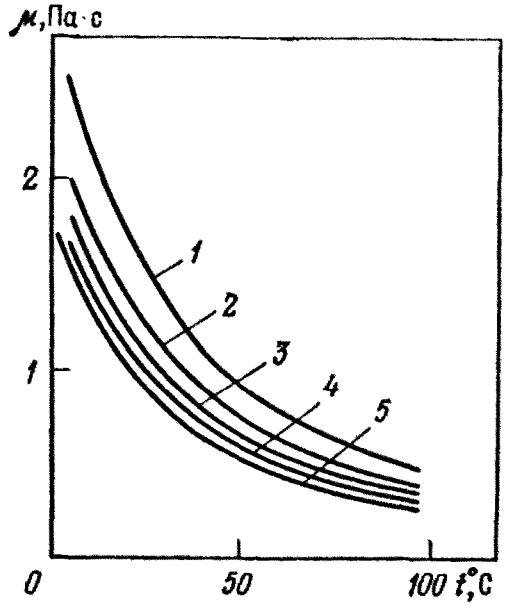


Рис. 26. График зависимости вязкости воды от температуры при разной минерализации.

Минерализация (в г/л): *1* — 220, *2* — 180, *3* — 140, *4* — 100, *5* — 0

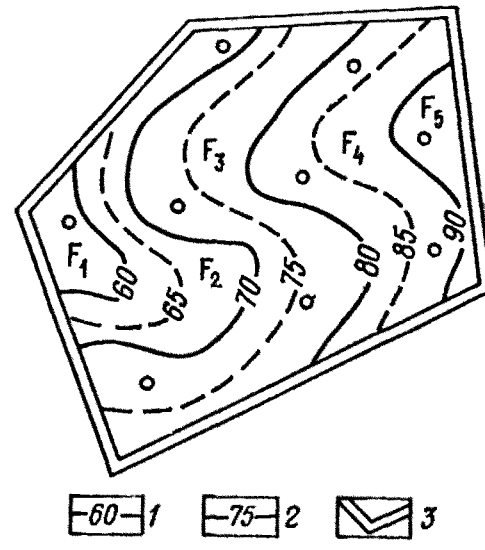


Рис. 27. Схема для определения средневзвешенной эффективной мощности водоносных пород.

Изопахиты: *1* — основные; *2* — промежуточные; *3* — контуры площади, изученной по данным бурения

выклинивании отдельных водоносных и водоупорных горизонтов, гидравлической взаимосвязи.

Эффективная мощность в каждой исследуемой точке (скважине) определяется как сумма мощностей отдельных водоносных пластов, горизонтов или зон:

$$m = m_1 + m_2 + \ldots + m_n = \sum_1^n m_i,$$

где m — суммарная эффективная мощность водоносных пород в скважине (точке); m_1, m_2,..., m_n — мощности отдельных выделенных в разрезе водоносных пластов или горизонтов.

Особенности подсчета эксплуатационных запасов промышленных вод приводят часто к необходимости оценки средней взвешенной для участка или района мощности водоносного комплекса (горизонта), при определении которой целесообразно придерживаться следующего порядка. В случае достаточно четкой корреляции отдельных водоносных горизонтов или пластов в пределах изучаемого района или разведуемого участка определяется мощность каждого такого пласта или горизонта. Затем для них строятся карты изолиний равных мощностей в пределах изученного контура участка. Площадь разбивается на части (участки), характеризующиеся одинаковой мощностью пласта m^k_i (т. е. пласта k в точке i). Путем планиметрирования каждого участка средняя взвешенная по площади мощность пласта определяется по формуле

$$m^k_{\text{ср}} = \frac{m_1{}^k F_1 + m_2{}^k F_2 + \ldots + m_n{}^k F_n}{F_1 + F_2 + \ldots + F_n} = \frac{\sum_1^n m_i{}^k \cdot F_i}{\sum_1^n F_i};$$

Средняя взвешенная эффективная мощность водоносного комплекса рассчитывается как сумма средних взвешенных мощностей отдельных пластов:

$$m_{\text{ср}} = m^1{}_{\text{ср}} + m^2{}_{\text{ср}} + \ldots + m_{\text{ср}}{}^k = \sum_1^k m^i{}_{\text{ср}}.$$

При отсутствии четкой корреляции отдельных водоносных горизонтов и пластов в толще водоносного комплекса по каждой скважине определяется суммарная эффективная мощность водоносного комплекса и затем составляется карта изменения суммарной эффективной мощности. Средняя взвешенная эффективная мощность определяется в этом случае по формуле

$$m_{\text{ср}} = \frac{m_1 F_1 + m_2 F_2 + \ldots + m_n F_n}{F_1 + F_2 + \ldots + F_n} = \frac{\sum_1^n m_i \cdot F_i}{\sum_1^n F_i}.$$

Схема для определения средней взвешенной эффективной мощности водоносных пород на участке гидрогеологических исследований приведена на рис. 27. При отсутствии в пределах участка достаточного количества скважин для составления карт равных эффективных мощностей определяется средняя арифметическая мощность водоносных пород. В некоторых случаях для оценки мощности пород используются методы экстраполяции имеющихся данных с учетом общих геологических и гидрогеологических закономерностей.

Определение полной и эффективной мощности водоносных пород имеет весьма важное значение в гидрогеологических расчетах как при оценке параметров, так и при подсчете запасов подземных промышленных вод. В частности, характеристика мощности необходима при определении коэффициентов фильтрации, проницаемости и пьезопроводности пород, при оценке несовершенства скважин по степени и характеру вскрытия водоносных горизонтов и оценке влияния несовершенства на точность определения расчетных параметров. Мощность непосредственно входит во все формулы для подсчета эксплуатационных запасов подземных вод гидродинамическими методами.

Гидродинамические методы определения водопроводимости и пьезопроводности позволяют охарактеризовать осредненные по площади параметры. Другие методы дают возможность определить значения этих параметров лишь в отдельных точках пласта. Эти методы основаны на обработке результатов наблюдений за дебитами и уровнями при откачках из поисковых и разведочных

гидрогеологических скважин и за восстановлением уровня в скважинах после прекращения откачек.

Методике определения параметров водоносных пород по данным опробования глубоких скважин посвящена специальная литература по гидрогеологии и нефтяной геологии. Учитывая состояние разработки этого вопроса, в настоящей книге изложены лишь основные сведения о методах гидродинамических расчетов. Основное внимание уделяется оценке влияния специфических факторов, присущих глубоким водоносным горизонтам, на точность определения характеризующих эти горизонты параметров. Как показывает опыт разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных минеральных, термальных и промышленных вод в различных гидрогеологических районах страны, такие факторы оказывают часто значительное влияние на точность расчета параметров и, следовательно, на достоверность оценки экоплуатационных запасов.

Определение коэффициентов фильтрации, водопроводности и пьезопроводности пород производится путем обработки результатов опытных работ на скважинах. При региональных гидродинамических построениях и оценке прогнозных эксплуатационных запасов промышленных вод основные сведения о параметрах глубоких водоносных горизонтов могут быть получены путем обработки данных опробования поисковых и разведочных скважин на нефть и газ, а также опорных скважин. Реже такие сведения могут быть получены при проведении специальных гидрогеологических исследований, и в некоторых случаях — путем обработки данных эксплуатации нефтяных и газовых месторождений.

Из-за отсутствия единой методики испытаний поисковых и разведочных скважин на нефть и газ получаемые в процессе опытных работ материалы имеют разную степень достоверности. В практике газонефтепоисковых и разведочных работ применяются следующие виды опробования скважин: а) прокачка с целью разглинизации водо-нефтегазоносных горизонтов для обеспечения притока пластовых вод (нефти и газа) в скважину; б) кратковременные опытные выпуски из фонтанирующих скважин при разных режимах работы с целью построения индикаторных кривых для оценки продуктивности пород; в) кратковременные откачки с применением эрлифтов или глубинных насосов при отсутствии самоизлива; г) восстановление давления (уровня) после окончания опытных работ на скважинах; д) понижение давления в реагирующих скважинах (метод гидропрослушивания), выполняемое обычно на площадях детальной разведки или эксплуатируемых нефтяных и газовых месторождениях.

Специальные гидрогеологические исследования проводятся с целью изучения водоносных горизонтов и комплексов при проведении поисковых и разведочных работ на месторождениях подземных промышленных вод. Основными видами таких работ являются откачки и выпуски, которые в зависимости от назначения и, соответственно, от продолжительности квалифицируются как пробные,

опытные или опытно-эксплуатационные (одиночные, кустовые и групповые).

Пробными откачками (выпусками) опробуются все выделенные при бурении перспективные водоносные горизонты с целью предварительной оценки их фильтрационных свойств и изучении качества воды по показателям, определяющим ее промышленную ценность.

Опытные откачки проводятся с целью определения основных гидрогеологических параметров, а также граничных условий водоносных горизонтов по их простиранию и в разрезе месторождения. Опытные откачки могут быть одиночными и кустовыми, в зависимости от наличия вблизи испытываемой специальных наблюдательных или соседних разведочных скважин. Опытно-эксплуатационные откачки из одной или нескольких скважин проводятся обычно в сложных геолого-тектонических и гидрогеологических условиях с целью уточнения граничных условий и параметров водоносных отложений и определения оптимальной производительности эксплуатационных скважин.

Все полученные в процессе опытных гидрогеологических работ материалы, несмотря на их разнообразие, могут обрабатываться по общему плану с использованием основных положений теории упругого режима пластовых водонапорных систем. Основой для определения параметров являются кривые снижения уровня (давления) при постоянном дебите скважин или дебите при поддерживании постоянного напора, а также кривые восстановления уровня (давления) в скважинах после окончания опыта. В некоторых случаях для определения параметров могут быть использованы кривые продуктивности скважин (кривые зависимости дебита от понижения уровней). Иногда, как будет показано ниже, определение параметров с достаточной степенью точности может быть выполнено по результатам кратковременного опробования скважин.

Как известно, основным уравнением, описывающим движение упругой жидкости в упругом пласте, является дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial S}{\partial t}, \qquad (19)$$

которое для случая осесимметричной фильтрации имеет вид:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial S}{\partial r} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial S}{\partial t}.$$

Решение этого уравнения позволяет получить все необходимые расчетные формулы для определения гидрогеологических параметров и оценки эксплуатационных запасов подземных вод практически для всех поддающихся геометризации начальных и граничных гидрогеологических условий. Возможность при решении уравнения (19) использовать принцип наложения течений (суперпозиции) обеспечивает проведение расчетов в случаях работы двух и более скважин и водозаборов. В таких случаях понижение в точке, выз-

ванное действием нескольких скважин или водозаборов, определяется как сумма понижений, вызванных работой каждой (или каждого) из них.

Решением уравнения (19) в случае движения подземных вод к точечному стоку в неограниченном водоносном горизонте при упругом режиме является формула:

$$S = \frac{1}{4\pi km} \int_0^t \frac{Q(t)\, e^{-\frac{r^2}{4at}}}{t}\, dt. \tag{20}$$

Для наиболее распространенного случая работы скважины с постоянным дебитом формула (20) приобретает вид:

$$S = \frac{Q}{4\pi km}\left[-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)\right], \tag{21}$$

где S — понижение уровня; a — коэффициент пьезопроводности; t — время; r — расстояние от источника возмущения до точки, в которой определяется понижение уровня на определенный момент времени t; k — коэффициент фильтрации; m — мощность водоносного горизонта; Q, $Q(t)$ — дебит точечного источника (скважины).

На практике обычно используют логарифмическое приближение функции E_i в формуле (21), которое с точностью до 5 % может заменить решение (20) при соблюдении условия $r^2/4at \leqslant 0{,}1$, т. е.

$$-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \approx \ln\frac{2{,}25at}{r^2}.$$

При этом расчетная формула для определения понижения уровня в скважине приобретает вид:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln\frac{2{,}25at}{r^2}, \tag{22}$$

а движение подземных вод к скважинам приобретает квазиустановившийся характер, отличительной особенностью которого является одинаковый темп снижения давления (уровня) во всех точках внутри зоны, фильтрации, для которой справедливо условие $r^2/4at \leqslant 0{,}1$. В этой зоне кривые понижения давления (уровня) во времени перемещаются параллельно друг другу. Точность расчетов при замене экспоненциальной функции логарифмической показана на графике рис. 28. Используя возможность замены точной экспоненциальной функции логарифмическим приближением, можно определить время t_0 наступления и радиус r_0 зоны квазистационарного режима:

$$t_0 \geqslant 2{,}5r^2/a; \quad r_0 = 0{,}63\sqrt{at}.$$

Расчетный радиус влияния $r_к$ при неустановившемся режиме откачки с постоянным дебитом при известном коэффициенте пьезопроводности определяется по формуле

$$r_к = 1{,}5\sqrt{at}. \tag{23}$$

При выводе уравнения (21) точечный сток, подразумеваемый уравнением (20), заменяется реальной скважиной с радиусом r_c. Такая замена возможна в случае, если $\omega_0 S/Q_t < 0{,}05$, т. е. когда отбираемое из самой скважины, площадь сечения которой равна ω, количество воды пренебрежимо мало по сравнению с общим ее отбором. Это условие выполняется обычно в самый начальный период опытных работ. Тем не менее, возможность применения расчетных формул (21) и (22) следует проверять при откачках из пород с плохими коллекторскими свойствами, когда время t для выполнения условия (23) будет достигать заметной величины.

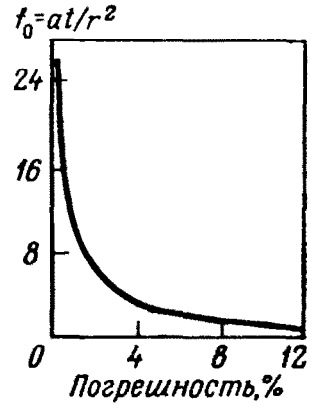


Рис. 28. Значение погрешности при замене точной формулы (20) приближенной (22)

Функции $E_i(-r^2/4at)$ и $\ln 2{,}25at/r^2$ получили в гидрогеологической литературе название гидравлических сопротивлений и обозначаются символом R. Для удобства вычислений в формуле (22) натуральный логарифм заменяется десятичным и она приобретает вид:

$$S = \frac{0.183Q}{km} \lg \frac{2{,}25at}{r^2}. \qquad (24)$$

Для определения параметров водоносных пород по кривым прослеживания понижения и восстановления уровня (давления) в скважине используется графоаналитический метод, суть которого заключается в том, что формула (22) представляется в виде уравнения прямой в полулогарифмических координатах. Для временного прослеживания уровня

$$S = A + C \lg t,$$

где

$$C = \frac{Q}{4\pi km}$$

и

$$A = C \lg \frac{2{,}25at}{r^2}.$$

График зависимости S—$\lg t$ при квазистационарном движении подземных вод имеет вид прямой линии с угловым коэффициентом C, отсекающей на оси абсцисс отрезок A (рис. 29). Коэффициент C определяется по координатам двух точек осредняющей прямой:

$$C = \frac{S_2 - S_1}{\lg t_2 - \lg t_1},$$

а значение коэффициента A снимается непосредственно с графика.

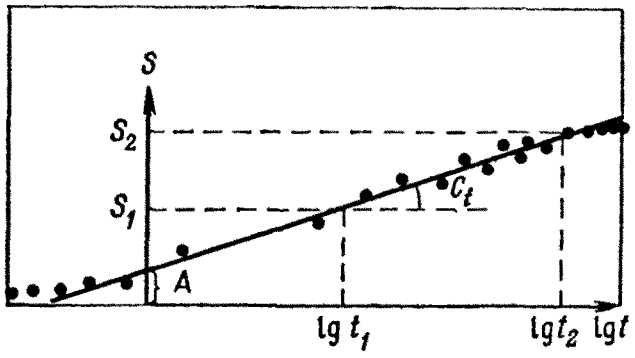


Рис. 29. График зависимости S от lg t при Q = const

В этом случае

$$km = \frac{0{,}183Q}{C},$$

$$\lg a = 2\lg r - 0{,}35 + \frac{A}{C}.$$

При наличии двух или нескольких скважин, расположенных на разных расстояниях от возмущающей, наряду с графиками вида S—lg t целесообразно построение графиков S—lg r (рис. 30). В этом случае производится прослеживание изменения уровня в зависимости от расстояния наблюдательных скважин до центральной (возмущающей), т. е. по площади изучаемого участка. В связи с этим определение параметров по кривым графика S—lg r получило название способа площадного прослеживания уровней. В этом случае расчетная формула имеет вид:

$$S = A + C\lg t,$$

где $C = \frac{S_1 - S_2}{\lg r_2 - \lg r_1}$; в этом случае

$$km = \frac{0{,}366Q}{C},$$

$$\lg a = \frac{2A}{C} - 0{,}35 - \lg t.$$

Способ комбинированного прослеживания, заключающийся в прослеживании изменения уровня во времени одновременно в нескольких наблюдательных скважинах и в построении полулогариф-

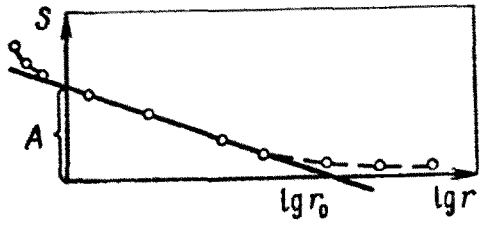


Рис. 30. График зависимости S от lg r при Q = const

мических графиков вида $S—\lg t/r^2$, аналогично предыдущему, предусматривает использование расчетной формулы

$$S = A + C \lg (t/r^2),$$

где

$$C = \frac{S_2 - S_1}{\lg \frac{t_2}{r_2^2} - \lg \frac{t_1}{r_1^2}}.$$

Коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности определяются по формулам

$$km = \frac{0{,}183Q}{C},$$

$$\lg a = \frac{A}{C} - 0{,}35.$$

Коэффициент C, как и ранее, определяется по координатам двух точек осредняющей кривой.

При наличии двух наблюдательных скважин при соблюдении условия $r^2/4at \leqslant 0{,}1$ водопроводимость определяется по формуле Дюпюн

$$km = \frac{0{,}366Q}{S_1 - S_2} \lg \frac{r_2}{r_1},$$

где S_1 и S_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах в один и тот же момент времени; r_1 и r_2 — расстояние от центральной до наблюдательных скважин.

В некоторых случаях опытные откачки или выпуски проводятся с разными дебитами, изменяющимися без остановки скважин, и таким образом откачка разделяется на два или несколько периодов. Для расчета параметров по результатам таких выпусков при двух значениях дебитов преобразованный график строится в координатах:

$$\Delta P(S) = f[\lg^{\alpha_1} (t - t_1)^{\alpha_2}].$$

Стоящая под знаком логарифма величина получается путем известного преобразования основного уравнения упругой фильтрации жидкости (21) и (22). Изменение дебита скважины с Q_1 на Q_2 рассматривается как результат включения в момент времени t от начала откачки в той же точке второй скважины с дебитом $Q_2—Q_1$. Используя принцип суперпозиции, можно получить:

$$S = \frac{0{,}183Q \lg \frac{2{,}25\,at}{r^2}}{km} + \frac{0{,}183\,(Q_2 - Q_1) \lg \frac{2{,}25a\,(t - t_1)}{r^2}}{km}. \qquad (25)$$

При замене Q_1/Q_2 на α_1 и $(Q_2—Q_1)/Q_2$ на α_2 формула (25) принимает вид:

$$S = \frac{0{,}183Q_2}{km} \lg 2{,}25a\,[t^{\alpha_1} (t - t_1)^{\alpha_2}]. \qquad (26)$$

Для удобства гидрогеологических расчетов и упрощения формул вводится понятие о приведенном времени работы скважины, которое равно $t_{пр} = t^{\alpha_1}(t-t_1)^{\alpha_2}$.

При соответствующей подстановке расчетная формула (26) принимает вид:

$$S = \frac{0{,}183Q_2}{km} \lg \frac{2{,}25at_{пр}}{r^2}, \qquad (27)$$

где $t_{пр}$ — приведенное время, по прошествии которого в точке пласта, отстоящей от возмущающей скважины на расстоянии r, было бы достигнуто понижение S, если бы скважина с самого начала работала с дебитом Q_2.

Если в процессе откачки дебит меняется, понижение уровня определяется по формуле, предложенной Л. С. Язвиным:

$$S = \frac{0{,}183Q_1}{km} \lg \left[\left(\frac{2{,}25a}{r^2} \right)^{1+\alpha_1+\alpha_2+\ldots+\alpha_n} t_{пр} \right],$$

где Q_1 — первоначальный дебит скважины; $t_{пр}$ — приведенное время работы скважины

$$t_{пр} = t(t-t_1)^{\alpha_1} \cdot (t-t_2)^{\alpha_2} \cdot \ldots \cdot (t-t_i)^{\alpha_i} \cdot \ldots \cdot (t-t_n)^{\alpha_n};$$

t — полное время откачки, t_i — время i-го изменения дебита; причем $\alpha_i = (Q_{i+1} - Q_i)/Q_1$.

Гидрогеологические параметры из формулы (27) могут быть определены рассмотренными выше графоаналитическими методами.

Следует отметить, что графики прослеживания давлений (уровней) практически никогда не являются строго прямолинейными. Это объясняется целым рядом факторов, которые связаны с неравномерностью водоотбора в процессе опытных и эксплуатационных откачек; с гидродинамическим несовершенством скважин; с изменениями в процессе откачек, особенно в начальный их период, проницаемости призабойной зоны, с немгновенным прекращением притока воды в скважины после их остановок и т. д. Поэтому часто, особенно при изучении глубоких водоносных горизонтов, определение расчетных гидрогеологических параметров (в первую очередь водопроводимости) производится по кривым восстановления уровня (давления) после остановки работающей скважины. В этом случае значительно уменьшается влияние несовершенства скважины и их призабойной зоны; однако ощутимое влияние на ход восстановления уровней могут оказывать изменения температуры в стволе простаивающих скважин и свободно выделяющийся газ. Ниже будет показано, что влияние этих факторов может существенно исказить истинную картину восстановления давления.

По принципу суперпозиции остановка скважины, из которой производилась откачка, заменяется пуском равнодебитной нагнетательной скважины. В этом случае можно определять водопроводимость, используя рассмотренные выше решения основного уравнения упругого режима фильтрации. Учитывая, что после оста-

новки скважины некоторое время продолжается снижение уровня воды в зоне влияния откачки, повышение уровня воды на любой момент времени t после прекращения откачки в любой точке на расстоянии r от скважины для случая квазиустановившегося движения может быть выражено формулой

$$S' = \frac{0{,}183Q}{km}\left[-\lg\frac{T+t}{T} + \lg\frac{2{,}25at}{r^2}\right], \qquad (28)$$

где T — полное время откачки с дебитом Q до момента остановки скважины; S — повышение уровня от динамического.

При достаточно длительном времени откачки T по сравнению с временем восстановления уровня t в формуле (28) первый член в скобках будет пренебрежимо мал: в этом случае она становится аналогичной формуле (22) и расчет параметров можно вести уже рассмотренными методами с использованием полулогарифмических кривых восстановления давления (рис. 31). При большем времени восстановления уровня эти методы неприменимы, так как скорость восстановления уровня постепенно становится соизмеримой со скоростью продолжающегося его снижения под воздействием остановленной откачки. В этом случае при $t \geqslant 2{,}5r^2/a$ понижение уровня от статического на любой момент времени восстановления будет равно:

$$S = \frac{0{,}183Q}{km}\lg\frac{T+t}{t},$$

а повышение уровня от достигнутого при откачке динамического составит:

$$S' = \frac{0{,}183Q}{km}\lg\frac{2{,}25atT}{r^2(t+T)}.$$

Принимая $tT/(t+T) = t_{пр}$,

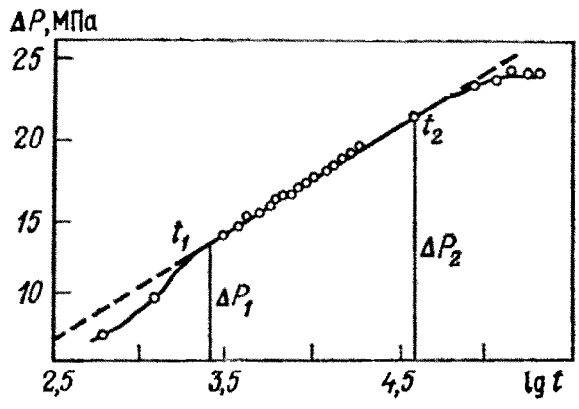


Рис. 31. График восстановления давления в скважине

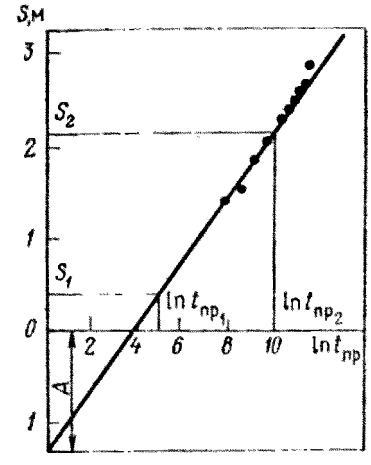


Рис. 32. График $S=f(\ln t_{пр})$ по наблюдательной скважине

получим

$$S' = \frac{0{,}183Q}{km} \lg \frac{2{,}25at_{пр}}{r^2}. \qquad (29)$$

Примерный график $S=f(\ln t_{пр})$ показан на рис. 32. Формула (29), как и (28) при $T \geqslant t$, может быть использована для расчетов параметров графоаналитическими методами.

Коэффициент пьезопроводности характеризует темп перераспределения пластового давления в условиях упругого режима фильтрации и зависит от проницаемости пласта (горизонта), вязкости жидкости и упругих свойств пласта и насыщающей его жидкости. Так как между проницаемостью и пьезопроводностью существует прямая зависимость, закономерности изменения пьезопроводности связаны с изменениями проницаемости горизонта. Неравномерная проницаемость водоносных пород глубоких горизонтов, особенно характерная для трещиноватых коллекторов, определяет соответственные неравнозначные результаты определения пьезопроводности таких отложений.

В пористых коллекторах со сравнительно выдержанной проницаемостью пьезопроводность в разных точках пласта, как правило, изменяется незначительно. Поэтому как при определении коэффициентов пьезопроводности, так и при подсчете средних его значений следует учитывать гидрогеологические условия залегания и характер водоносного горизонта.

Существует несколько методов определения коэффициента пьезопроводности по данным опытных откачек. Из них наиболее точными являются определения по результатам прослеживания снижения и восстановления уровня (давления) в наблюдательных скважинах при проведении кустовых откачек. В этих случаях коэффициент пьезопроводности может быть рассчитан с использованием временны́х, площадных и комбинированных полулогарифмических графиков прослеживания уровней.

Если замена точной формулы (21) приближенной (22) приводит к значительным погрешностям, коэффициент пьезопроводности может быть определен методом подбора из соотношения:

$$\frac{S_1(\Delta P_1)}{S_2(\Delta P_2)} = \frac{E_1\left(-\frac{r^2}{4at_1}\right)}{E_2\left(-\frac{r^2}{4at_2}\right)}. \qquad (30)$$

Для сокращения расчетов и упрощения точного определения a из соотношения (30) используют способ построения вспомогательных графиков, как это показано на рис. 33.

Известно, что после пуска возмущающей скважины с постоянным дебитом уровень (забойное давление) в наблюдательной (реагирующей) скважине остается вначале практически неподвижным. Затем начинается сначала медленное, а потом все более ускоренное понижение уровня в реагирующей скважине. В некоторый момент времени темп снижения уровня (падения давления)

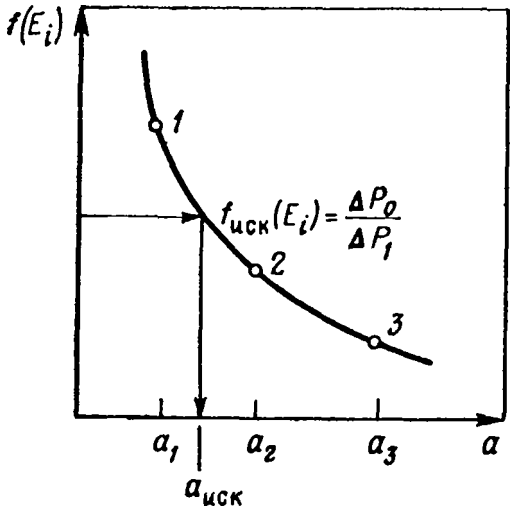


Рис. 33. Вспомогательный график для нахождения величины a.
$1-f_1(E_i)$; $2-f_2(E_i)$; $3-f_3(E_i)$

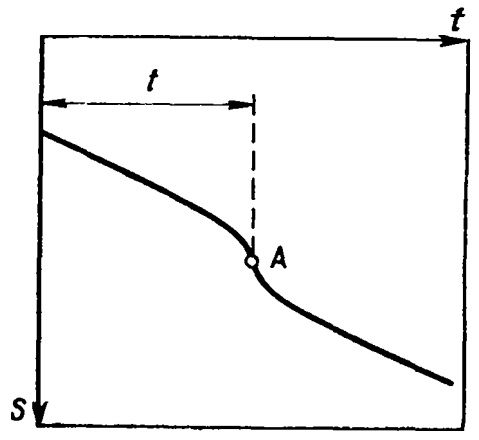


Рис. 34. График понижения уровня (давления) S в наблюдательной скважине при откачке с постоянным дебитом

достигает максимальной величины, после чего непрерывно уменьшается. На графике понижения уровня (давления) во времени (рис. 34) показана характерная точка перегиба, соответствующая моменту максимальной скорости падения давления в пласте. Это обстоятельство может быть использовано для определения коэффициента пьезопроводности по графику $S=f(t)$ понижения уровня в наблюдательной скважине.

В. Н. Щелкачев доказал, что для точки перегиба А (см. рис. 34) справедливо следующее равенство:

$$4at = r^2, \tag{31}$$

отсюда

$$a = \frac{r^2}{4t}.$$

При проведении тщательных и систематических измерений уровня или давления (пластового или избыточного на устье) точку перегиба можно установить достаточно точно. Зависимость (31) может быть использована для решения обратной задачи — определения необходимой продолжительности откачек из кустов скважин в зависимости от положения центральных и наблюдательных скважин (табл. 58).

Выше рассмотрены методы определения коэффициента пьезопроводности по данным наблюдений за понижением уровней или давлений в наблюдательных скважинах при откачках из центральных (возбуждающих). Однако при разведке глубоких подземных вод вследствие больших глубин и значительной стоимости скважин устройство специальных опытных кустов не всегда целесообразно. Кроме того, близкое расположение разведочных скважин друг от

Таблица 58

Необходимая продолжительность откачки до момента достижения максимальной скорости понижения уровня в наблюдательных скважинах

Расстояние между центральной и наблюдательной скважинами, м	Продолжительность откачки (в сут) при a, (м²/сут)					
	10^3	$5\cdot10^3$	10^4	$5\cdot10^4$	10^5	$5\cdot10^5$
200	10,0	2,0	1,0	0,2	0,1	0,02
300	22,5	4,5	2,2	0,5	0,2	0,04
500	62,5	12,5	6,3	1,2	0,6	0,12
750	140,5	28,1	14,0	2,8	1,4	0,28
1 000	250,0	50,0	25,0	5,0	2,5	0,50
1 500	562,5	112,5	56,2	11,3	5,6	1,12
2 000	1000,0	200,0	100,0	20,0	10,0	2,0
2 500	—	312,5	156,2	31,2	15,6	3,1
5 000	—	1250,0	625,0	125,0	62,5	12,5
10 000	—	—	25 000,0	500,0	250,0	50,0

друга ограничивает возможности их полного использования для последующей эксплуатации. При проведении кустовых откачек из скважин, расположенных на большом расстоянии друг от друга, значительно возрастает время опытных откачек (см. табл. 58). Поэтому большой практический интерес представляют методы определения коэффициента пьезопроводности по результатам откачек из одиночных скважин.

В работе С. С. Бондаренко, Л. В. Боревского и др. [16] изложен метод, основанный на сопоставлении и использовании результатов определения коэффициентов пьезопроводности по данным кустовых и одиночных откачек. Известно, что одним из факторов, затрудняющих определение коэффициента пьезопроводности, является так называемый «скин-эффект», характеризующий изменение водовмещающих пород в призабойной зоне скважин в процессе бурения и откачек. Такие изменения вызывают дополнительные фильтрационные сопротивления, которые влияют на абсолютные понижения уровней (давлений), но не могут быть определены и учтены в процессе опытных откачек из центральных или одиночных скважин. С учетом этих дополнительных фильтрационных сопротивлений для совершенных по степени и характеру вскрытия пласта скважин суммарная величина понижения уровня выражается формулой

$$S_{\text{п}} = \frac{0{,}183Q}{km}\left(\lg\frac{2{,}25at}{r^2_{c_1}} + \varphi\right),$$

где $S_{\text{п}}$ — полное понижение уровня; r_{c_1} — приведенный радиус эквивалентной совершенной скважины; φ — дополнительное сопротивление (фактор повреждения, по Л. В. Боревскому) пласта в призабойной зоне, возникающее в результате изменения фильтрационных свойств пород вблизи стенок скважин.

Если величина φ положительная, то фильтрационные свойства пород в призабойной зоне хуже, чем в остальной части пласта, и наоборот. В сходных гидрогеологических условиях (например, в пределах разведуемого эксплуатационного участка глубоких подземных вод) при одинаковом способе бурения в начальный период опытных откачек дебит должен быть примерно одинаковым во всех скважинах. Это обстоятельство можно использовать для определения коэффициента пьезопроводности по результатам исследования одиночных скважин.

Согласно формулам (22) и (24), величина A (см. рис. 29) равна

$$A = \frac{0{,}183}{km}\left(\lg\frac{2{,}25a}{r^2_{c_1}} + \varphi\right). \qquad (32)$$

Определив a по результатам наблюдений за реагирующей скважиной, расчетом определяется A', отсекаемая на оси S графика $S—\lg t$ при дополнительных сопротивлениях, равных 0 ($\varphi=0$):

$$A' = \frac{0{,}183}{km}\lg\frac{2{,}25a}{r^2_{c_1}}\ . \qquad (33)$$

Вычитая равенство (33) из равенства (32), получим

$$A - A' = \frac{0{,}183Q}{km}\varphi,$$

откуда $A - A' = C\varphi$,

или $\varphi = \dfrac{A - A'}{C}$.

Таким образом, имея данные опытной кустовой откачки и определив для сравнительно однородного участка среднее значение величины φ, можно использовать ее для определения коэффициента пьезопроводности по результатам одиночных откачек из скважин:

$$\lg a = 2\lg r_c - 0{,}35 + \frac{A}{C} - \varphi.$$

Представляет интерес способ определения коэффициента пьезопроводности по данным одиночных откачек из скважин, предложенный А. Г. Арье. Сущность его заключается в изучении зависимости между дебитом и понижением уровня, отражающим несовершенство скважины, при проведении серии кратковременных одиночных откачек. В целях исключения влияния возможного изменения при откачках разной производительности рабочей мощности пласта (что имеет место при наличии в разрезе пород разной проницаемости) автор способа рекомендует определять показатель интенсивности работы скважины, представляющий собой произведение понижения уровня S при заданном дебите Q скважины на водопроводимость km, определенную при том же дебите. Понижение уровня выбирается на один и тот же период времени от начала каждой из кратковременных откачек.

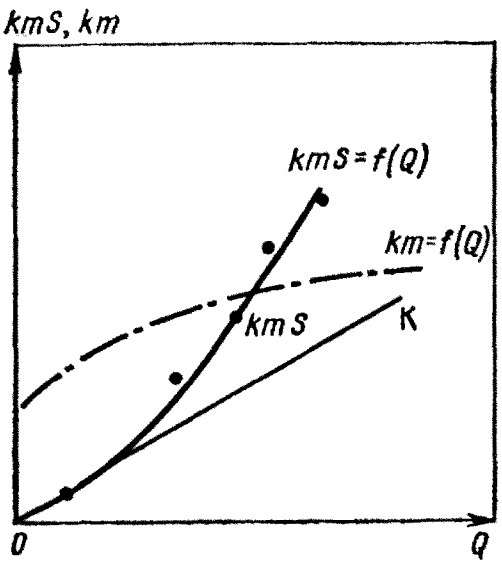


Рис. 35. График $km=f(Q)$ и $kmS=f(Q)$ при серии кратковременных откачек. *По А. Г. Арье*

В результате опытных работ устанавливаются зависимости (рис. 35) $kmS=f(Q)$ и $km=f(Q)$. Имеется в виду, что касательная К к кривой $km=fQ$ характеризует эту зависимость при отсутствии гидравлических сопротивлений, т. е. при $C=0$. Сравнивая значение произведения (kmS), полученное в процессе продолжительной откачки при дебите скважины Q, с тем же произведением, полученным без учета гидравлических сопротивлений $(kmS)_{\text{п}}$, определяют показатель гидродинамического несовершенства скважины С:

$$C=\frac{(kmS)_{\text{ф}}-(kmS)_{\text{п}}}{0{,}183Q},$$

где $S'_{\text{ф}}$ — фактически замеренное понижение; $S_{\text{п}}$ — расчетное понижение без учета гидравлических потерь. Коэффициент пьезопроводности при известном С определяется без особых трудностей.

К недостаткам способа А. Г. Арье следует отнести невозможность дифференциации технических и гидравлических факторов несовершенства скважин, а также отсутствие каких-либо рекомендаций по длительности проведения «продолжительной» одиночной откачки. Способ не исключает влияния на точность определения пьезопроводности граничных условий пласта, которые могут проявиться при проведении достаточно продолжительных откачек.

Выше рассмотрены общие методы оценки расчетных гидрогеологических параметров по результатам опытных работ на скважинах в случаях, отвечающих условиям напорной фильтрации жидкости в бесконечном в плане пласте. На практике интерпретация результатов опытных работ и, следовательно, правильная оценка расчетных параметров осложняется влиянием природных гидрогеологических факторов и тех, которые обусловлены техническими условиями проведения опытных работ и спецификой подземных вод глубоких горизонтов.

К числу первых относится влияние граничных условий по простиранию водоносных горизонтов и в разрезе вскрываемых скважинами пород. Оно может проявляться в случаях близости опытных скважин к экранирующим или водопроводящим тектоническим нарушениям, зонам выклинивания или фациального замещения водоносных отложений; в случае гидравлической взаимосвязи занимающих разное положение в разрезе водоносных горизонтов. При правильно поставленных гидрогеологических опытах такие факторы выявляются и учитываются путем корректной интерпретации полученных результатов. Методика расчета гидрогеологиче-

ских параметров для таких случаев достаточно полно рассмотрена в специальной литературе, в частности в работе [4].

Вторая группа факторов связана с гидравлическим несовершенством глубоких скважин, особенностями проведения в этих скважинах опытных гидрогеологических исследований и влиянием некоторых параметров откачки (например, дебитов), а также температур и газового фактора на точность определения понижений динамических уровней.

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБОКИХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

Одним из факторов, искажающих истинную картину понижения уровней в процессе опытных откачек, является несовершенство скважин по степени и характеру вскрытия водоносных горизонтов. При исследованиях глубоких подземных промышленных вод это несовершенство скважин является весьма ощутимым.

Действительно, в большинстве гидрогеологических районов СССР подземные промышленные воды приурочены к мощным толщам терригенных, в разной степени консолидированных отложений и реже — к толщам пористых, трещиноватых и закарстованных пород. Большие глубины залегания промышленных водоносных горизонтов препятствуют установке фильтров, разработанных главным образом для сравнительно неглубоких скважин на пресные подземные воды. Поэтому опытное опробование глубоких скважин производится, как правило, под защитой обсадных труб и затрубного цементного кольца. Для предохранения обсадной колонны труб от деформаций, смятия и разрыва под действием пластового давления на больших глубинах приходится ограничивать по длине интервалы перфорации обсадных труб и затрубного цементного кольца, и ограничивать также количество перфорации в интервалах вскрытия водоносных горизонтов. Это приводит к несовершенству скважин как по степени, так и по характеру вскрытия водоносного горизонта (комплекса). В свою очередь абсолютные величины падения уровней (пластовых давлений), фиксируемые в стволе (или на устье при самоизливе) работающих скважин, будут отличаться от понижения уровней и давлений в пласте на стенках скважин вследствие их несовершенства, а также нарушений призабойной зоны скважин. При этом фактическое понижение давления в пласте будет меньше замеряемого; в этом случае расчетные значения водопроводимости по данным откачек будут занижены.

Дополнительное понижение уровня ΔS, вызванное несовершенством скважины, можно выразить формулой:

$$\Delta S = \frac{Q}{2\pi km}(\xi_1 + \xi_2), \qquad (31)$$

где ξ_1 — дополнительное сопротивление, определяемое несовершенством скважины по степени вскрытия водоносных пород; ξ_2 — то же, по характеру вскрытия водоносных пород.

Вопросы влияния гидродинамического несовершенства скважин по степени вскрытия водоносных пород для случаев неустановившейся фильтрации подземных вод подробно рассмотрены в работах А. Л. Хейна и Н. Н. Веригина. Основным исходным уравнением для определения понижения уровня в скважине, несовершенной по степени вскрытия пласта, является уравнение вида:

$$S = \frac{Q}{2\pi km}\left[-\frac{1}{2}E_i(-\alpha_0) + \xi_1\left(\frac{l}{m};\ \frac{m}{r};\ \alpha_0\right)\right],$$

где l — длина водоприемной части (фильтра) скважины; $\alpha_0 = \frac{r^2}{4at}$; $\left(\frac{l}{m};\ \frac{m}{r};\ \alpha_0\right)$ — параметры, от которых зависит величина ξ_1.

В случаях установившегося движения вместо экспоненциальной функции подставляется логарифмический член формулы Дюпюи $\ln r_к/r_с$.

Н. Н. Веригиным было получено общее выражение для определения ξ_1 и составлены таблицы, характеризующие эту величину для разных случаев расположения фильтров скважин в водоносных горизонтах и разном соотношении длины фильтра и мощности этого горизонта (табл. 59). Табличные данные широко используются в практике гидрогеологических расчетов; для облегчения последних они могут быть представлены в виде номограмм. Из табл. 59 следует, что на расстояниях от оси скважин, равных 0,5 мощности водоносного горизонта при $l \geqslant 0{,}1m$, несовершенство скважин пренебрежимо мало.

Таблица 59

Дополнительные сопротивления скважин для разных случаев расположения фильтров

l/m	m/r								
	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
Для фильтров, примыкающих к водоупору									
0,05	0,067	1,15	6,3	17,75	35,15	47,0	63,0	74,5	84,5
0,1	0,061	1,02	5,2	12,15	21,4	26,9	34,2	39,8	45,45
0,3	0,045	0,645	2,4	4,6	7,25	8,85	10,9	12,45	14,1
0,5	0,025	0,33	1,13	2,1	3,25	3,93	4,82	5,5	6,2
0,7	0,008	0,119	0,44	0,85	1,23	1,62	2,00	2,29	2,6
0,9	0,007	0,0125	0,064	0,15	0,264	0,332	0,423	0,49	0,66
Для фильтров, расположенных в средней части пласта									
0,1	—	0,45	2,3	6,7	16	21	28,5	35	—
0,2	—	0,4	1,6	4,6	9,5	12	16,5	20,5	—
0,3	—	0,3	1,2	3,2	5,6	7,2	9,2	10,9	—
0,5	—	0	0,6	1,5	2,45	3,15	4,05	4,3	—
0,7	—	"	0,25	0,6	0,9	1,2	1,75	2,0	—
0,9	—	"	0,0	0,0	3,25	0,3	0,4	0,5	—

Гидравлическое сопротивление, обусловленное несовершенством по характеру вскрытия пласта ξ_2 для скважин на промышленные воды, определяется в основном скважностью дырчатого фильтра, сооружаемого путем перфорации обсадных труб после спуска их в скважину и цементации затрубного пространства в целях изоляции испытываемого или эксплуатируемого водоносного горизонта. Это сопротивление определяется по эмпирической формуле В. И. Шурова, полученной путем моделирования притока к скважине в лабораторных условиях:

$$\xi_2 = \frac{425}{(b + 1{,}5)Nd_0} - 0{,}6, \quad (35)$$

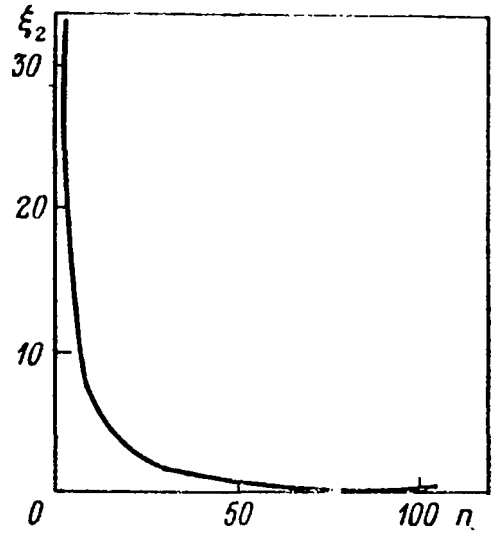


Рис. 36. График зависимости коэффициента несовершенства скважины ξ_2 от плотности перфорации (прострела)

где b – длина нулевого канала; N — количество прострелов на 1 м фильтра; d_0 – диаметр нулевого канала.

Как следует из приведенной формулы, величина ξ_2 не зависит ни от диаметра скважины, ни от геометрии расположения отверстий. Зависимость является приближенной; в расчетах невозможно использовать точные значения b и d_0. Однако теоретические исследования и электрическое моделирование показали хорошую сходимость результатов в области практически интересных значений входящих в нее величин. На рис. 36 показана зависимость коэффициента несовершенства ξ_2 от плотности перфорации (количества прострелов на 1 м) при диаметре отверстий $d_0 = 1$ см и глубине проникновения пуль в породу на 10 см.

Расчеты и экспериментальные данные показывают, что 15–20 прострелов на 1 м является оптимальным, поскольку дальнейшее увеличение количества отверстий не приводит к заметному увеличению дебита, но ослабляет колонну и удорожает скважину.

Коэффициенты несовершенства скважин ξ_2 и ξ_1 в гидрогеологических расчетах чаще всего учитываются введением в расчетные формулы вместо фактического радиуса скважины r_c приведенного радиуса эквивалентной совершенной скважины r'_c. С учетом равенства (34), принимая, что $\xi_1 + \xi_2 = C$, можно записать (по Б. С. Чернову, М. Н. Базлову и А. И. Жукову):

$$R = \ln \frac{1{,}5\sqrt{at}}{r_c'} + C$$

или, вводя радиус эквивалентной совершенной скважины r'_c:

$$R = \ln \frac{1{,}5\sqrt{at}}{r_c'}.$$

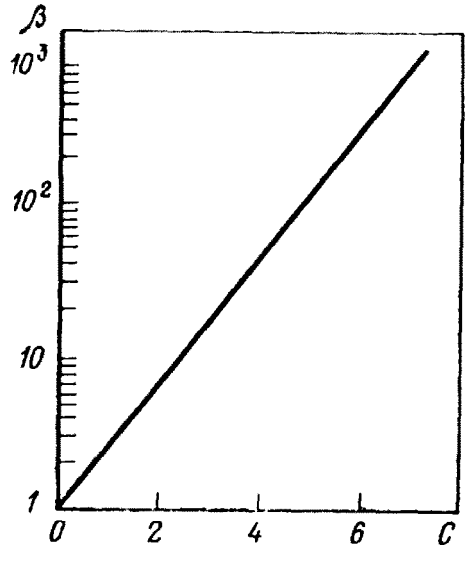


Рис. 37. График для определения коэффициента β

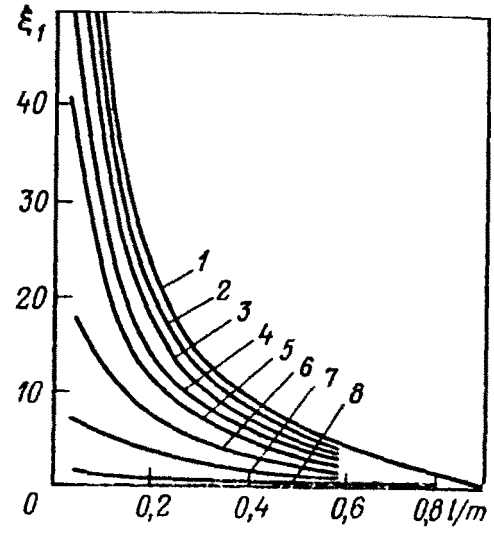


Рис. 38. График функции ξ_1 для расчета несовершенных скважин при m/r_c.

1 — 2000; *2* — 1000; *3* — 500; *4* — 200; *5* — 100; *6* — 50; *7* — 10; *8* — 3

Величина r'_c может быть определена из выражения $r'_c = r_c/\beta$, где r_c — фактический радиус несовершенной скважины; β — коэффициент, значение которого находят по графику (рис. 37) после определения дополнительного сопротивления C.

Для определения дополнительного сопротивления C, включающего несовершенство скважин по степени и характеру вскрытия пласта, из табл. 59 или по графику на рис. 38 находят ξ_1; затем ξ_2 — в такой последовательности: 1) определяется число отверстий перфорации N, равное обычно 10—20 на 1 м; 2) определяется произведение $2Nr_c$; 3) рассчитывается коэффициент $a = d_0N/2r_c$, где d_0 — диаметр пулевых отверстий (принимаемый обычно равным 0,011 м). Численное значение ξ_2 определяется по графикам, один из которых приведен на рис. 36, или по формуле (35).

В качестве примера рассмотрим случай определения дополнительного понижения уровня в одиночной скважине от ее несовершенства; скважина заложена в однородном неограниченном пласте. Исходные данные для расчета следующие: $Q = 1000$ м³/сут; $t = 3{,}65 \cdot 10^3$ сут; $r_c = 0{,}1$ м; $km = 40$ м²/сут; $m = 40$ м; $a = 10^5$ м²/сут; пласт вскрыт в верхней части на высоту $l = 20$ м; $N = 20$ отверстий на 1 м; $d_0 = 1$ см; $b = 0{,}05$ м.

Коэффициент ξ_1 для условий, соответствующих $l/m = 0{,}5$, $m/r_c = 400$, по табл. 59 равен 4,5. Для нахождения ξ_2 предварительно определяется произведение $2Nr_c$, которое равно $2Nr_c = 2 : 20 : 0{,}1 = 4$, далее $a = \frac{dN}{2r_c} = 0{,}05$; $i = \frac{b}{2r_c} = 0{,}25$. В этом случае ξ_2 определяется по графику на рис. 38 равным 2,5. Таким образом, полное дополнительное сопротивление C равно 7. При $C = 7$ коэффициент $\beta = 10^3$. С учетом этого радиус эквивалентной несовершенной скважины равен $r'_c = r_c/\beta = 0{,}1/10^3 = 10^{-4}$. Понижение уровня S_c в совершенной скважине равно

$$S_c = \frac{Q}{2\pi km} 2{,}3 \lg \frac{1{,}5\sqrt{at}}{r_c} = 49{,}96 \text{ м}.$$

Понижение уровня $S_{нс}$ в несовершенной скважине определяется также, но с подстановкой вместо r_c полученного значения r_c'

$$S_{нс} = \frac{Q}{2\pi km} 2{,}3 \lg \frac{1{,}5\sqrt{at}}{r_c'} = 77{,}39 \text{ м}.$$

Таким образом, дополнительное понижение уровня в скважине за счет ее несовершенства по степени и характеру вскрытия пласта составило 27,43 м, а коэффициент несовершенства скважины оказался равным 0,73.

Потери напора в водоподъемных трубах при движении воды от пласта до устья скважин возникают за счет преодоления разного рода сопротивлений — на трение, местные сопротивления, пульсацию потока жидкости и т. д. В силу этого, понижение давления или уровня, замеренное на устье скважины, будет больше, чем понижение забойного и пластового давления на величину этих потерь. Из общей суммы потерь напора линейные потери на трение составляют около 70 % (для компрессорных труб диаметром 0,05 м). Надо полагать, что при движении воды по обсадным трубам большого диаметра (0,122—0,197 м) потери напора на преодоление трения будут превалировать. Учитывая, что откачки промышленных вод происходят обычно из такого типа труб, целесообразно рассмотреть влияние на понижение устьевого давления только потерь напора на трение. Рассчитанное понижение пластового давления при наличии таких потерь будет несколько больше истинного, а следовательно, рассчитанные по опытным данным параметры водоносных пород окажутся заниженными. Для определения потерь напора в напорных трубопроводах, аналогом которых является скважина, целесообразно применять универсальную формулу Дарси

$$h = \frac{\lambda l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{или} \quad i = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

где h — потери напора в метрах водяного столба, приведенные к пресной воде; l — длина водопроводных (водоподъемных) труб; d — внутренний диаметр труб; v — скорость течения воды в трубах; g — ускорение свободного падения; i-гидравлический уклон; λ — коэффициент сопротивления.

Формула применима для любого вида движения — ламинарного, переходного и турбулентного. Коэффициент λ подсчитывается в зависимости от числа Рейнольдса Re; как показывает опыт, независимо от характера жидкости и диаметра труб критическая величина числа Re, при которой движение теряет ламинарный характер, подсчитывается по формуле $Re = vd/\nu$, где ν — кинематический коэффициент вязкости. При откачках и выпусках промышленных вод эта величина всегда значительно повышается, и движение происходит при переходном и, что чаще, турбулентном режиме.

Величины потерь напора на единицу длины трубопровода (гидравлический уклон) в зависимости от его диаметра d и скорости течения воды v приведены в табл. 60. В табл. 61 приведены потери напора h на 1000 м длины водоподъемных труб в зависимости от диаметра скважины и ее дебита. Из приведенных данных следует,

Таблица 60

Расчет гидравлического уклона в трубах

Скорость движения воды, м/с	Гидравлический уклон i при диаметре труб (в м)			Скорость движения воды, м/с	Гидравлический уклон i при диаметре труб (в м)		
	0,122	0,144	0,197		0,122	0,144	0,197
0,1	0,000278	0,000224	0,000149	1,2	0,0236	0,019	0,01266
0,2	0,000934	0,00075	0,0005	1,3	0,028	0,0225	0,015
0,3	0,0019	0,00153	0,00102	1,4	0,0326	0,0262	0,01745
0,4	0,00318	0,00256	0,001705	1,5	0,0373	0,03	0,02
0,5	0,00476	0,00383	0,00255	1,6	0,0423	0,0341	0,0227
0,7	0,00875	0,00704	0,00468	1,7	0,048	0,0386	0,0257
0,8	0,0112	0,009	0,006	1,8	0,0537	0,0432	0,0288
0,9	0,014	0,01128	0,00751	1,9	0,06	0,0482	0,0321
1,0	0,169	0,0136	0,00906	2,0	0,0664	0,0534	0,0355

что потери напора резко возрастают с увеличением скорости течения, т. е. с увеличением дебита скважины и уменьшением диаметра водоподъемных труб, и могут достигать больших величин. В силу этого понижение давления воды, замеренное на устье скважины, будет больше, чем понижение пластового давления. Поэтому коэффициент водопроводимости, рассчитанный по методу индикаторных диаграмм с использованием замеров понижений уровней на устье скважины, будет заниженным. При расчете водопроводимости графоаналитическим методом потери напора в трубах не учитываются, так как при постоянном дебите откачки их величина во времени не меняется. Однако при расчете коэффициента пьезопроводности эту поправку надо учитывать, поскольку этот коэффициент зависит не только от темпа падения давления, но и от абсолютной величины понижения уровня.

Таблица 61

Потери напора h в трубах разного диаметра, м/1000 м

Дебит, м³/сут	d=0,122 м [5"]		d=0,144 м [6"]		d=0,197 м [8"]	
	v, м/с	h, м	v, м/с	h, м	v, м/с	h, м
500	0,496	4,6	0,355	2,0	0,19	0,5
1000	0,990	16,6	0,71	7,2	0,38	1,55
1500	1,485	36,6	1,065	13,7	0,57	3,2
2000	1,98	65,4	1,42	27,0	0,76	5,4
2500	2,475	102,0	1,775	42,0	0,95	8,2
3000	2,97	147,1	2,13	60,6	1,14	11,55

В большинстве случаев в минеральных, термальных и промышленных подземных водах содержится в том или ином количестве растворенный газ. При движении пластовой воды от забоя к устью скважины на определенной глубине, где давление становится равным давлению насыщения, газ начинает выделяться из воды. По мере дальнейшего движения воды вверх количество выделившегося из нее газа увеличивается, достигая максимальной величины, равной газовому фактору, при атмосферном давлении, т.е. у динамического уровня. Величина давления насыщения зависит от объема растворенного в воде газа, его состава, а также от температуры и минерализации воды.

В результате того что плотность газоводяной смеси меньше, чем чистой воды, понижение уровня (или избыточного давления), замеренного на поверхности, в случае выделения газа в стволе скважины будет меньше, чем в пластовых условиях, причем эта разница зависит от газового фактора, температуры воды, ее удельного объема, давления насыщения и абсолютной величины избыточного давления.

Величина столба газоводяной смеси h в скважине может быть определена по формуле Е. Е. Керкиса:

$$h = \frac{100}{\gamma}\left\{\left[\left(1 - \frac{C_0 P_0 \tau}{P_г}\right)(P_г - P_1)\right] + C_0 P_0 \tau \ln \frac{P_г}{P_1}\right\},$$

где $P_г$ — упругость растворенного газа (давление насыщения); P_1 — избыточное давление на устье, равное показанию устьевого манометра плюс атмосферное давление; P_0 — атмосферное давление; γ — плотность воды с учетом температуры и минерализации; C_0 — газовый фактор в нормальных условиях; τ — температурный коэффициент, равный $1+t/273$; t — температура воды в верхней части работающей скважины.

Дополнительное понижение напора ΔS в пластовых условиях по сравнению с замеренным на устье будет равно разнице в высоте столба газированной и негазированной жидкости

$$\Delta S = \frac{100(P_г - P_1)}{\gamma} - h,$$

или, с учетом формулы Е. Е. Керкиса

$$\Delta S = \frac{100 C_0 P_0 \tau}{\gamma}\left(\frac{P_г - P_1}{P_г} - \ln \frac{P_г}{P_1}\right).$$

Истинное понижение напора S, соответствующее снижению забойного давления $\Delta P_{заб}$, будет равно

$$S = \frac{100\,\Delta P_{изб}}{\gamma} - \Delta S,$$

а само понижение забойного давления

$$\Delta P_{заб} = \Delta P_{изб} - C_0 P_0 \tau\left(\frac{P_г - P_1}{P_г} - \ln \frac{P_г}{P_1}\right).$$

При отсутствии самоизлива $P_1 = P_0 \approx 1$. Величина ΔS достигает при этом максимального значения

$$S_{max} = \frac{100C_0\tau}{\gamma}\left(\frac{P_r - 1}{P_1} - \ln P_r\right). \quad (36)$$

Во всех случаях, когда имеет смысл учитывать наличие в воде растворенного газа, $P_r \geqslant 1$, и тогда вместо зависимости (36) получим

$$\Delta S_{max} = \frac{100C_0\tau}{\gamma}(1 - \ln P_r).$$

В табл. 62 приведены результаты расчетов величины ΔS в зависимости от C_0 и P_1 для условий одного из месторождений промышленных вод ($\gamma = 988 \cdot 10^3$ г/м^3 и $\tau = 1{,}25$). Значение ΔS увеличивается быстрее, чем значение газового фактора. При сравнительно больших значениях C_0 скважина, статический уровень которой был ниже поверхности земли, после возбуждения может стать самоизливающей; еще чаще наблюдаются отрицательные значения депрессии устьевого давления непосредственно после пуска скважины. Таким образом, расчет параметров без учета ΔS_r по формулам установившегося движения становится вообще невозможным, а графоаналитическим методом во всех случаях будут получены сильно завышенные значения коэффициентов водопроводимости вследствие резко замедленного темпа снижения устьевого давления за счет выделения газа в свободное состояние на глубине, соответствующей глубине давления насыщения.

Одним из факторов, искажающих представление об истинных значениях понижений динамических уровней в глубоких скважинах, является изменчивость плотности минерализованных вод в результате увеличения или уменьшения температуры. Изменение температуры, а следовательно и плотности воды по стволу скважины, определяется величиной геотермического градиента и температуры у поверхности земли в пределах пояса сезонных температур.

Таблица 62

Результаты определения ΔS (в м)

P_1, МПа	I	II	III	IV
1	29,7	40,7	51,7	63,5
2	22,8	32,2	41,4	51,5
3	19	27,2	35,6	41,5
4	16,2	23,4	41,4	39.3
5	14	21,1	28,2	35,8
6	12,5	19	25,6	32,6
7	11,1	17,3	23,5	30,1

Примечание. Условия проведения опыта: I — $C_0 = 0{,}8$, $P_r = 5$ МПа; II — $C_0 = 1$, $P_r = 6{,}8$ МПа; III — $C_0 = 1{,}2$, $P_r = 8{,}2$ МПа; IV — $C_0 = 1{,}4$, $P_r = 9{,}7$ МПа.

В период, когда скважина находится в покое, разница в температуре (и плотности) воды в пласте и у статического уровня (или на устье скважины) будет максимальной. В процессе откачки температура воды на устье будет зависеть от пластовой температуры и скорости движения воды по стволу скважины, т. е. от ее дебита (рис. 39).

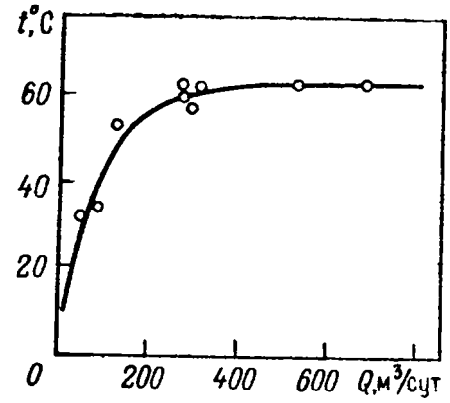


Рис. 39. График фактического изменения температуры воды на изливе в зависимости от дебита скважин

Если скважина, вскрывшая промышленные высокотемпературные воды, простаивала в течение длительного времени, то температуры по ее стволу распределяются в соответствии с характерным для данного района температурным градиентом, за исключением самой верхней части, подверженной влиянию суточных и сезонных колебаний температур. Как показывает опыт, в большинстве случаев это распределение подчиняется закону прямой линии. Поскольку плотность воды зависит от температуры, причем в практически интересных интервалах температур эта зависимость не сильно отличается от прямолинейной, можно с достаточной точностью написать следующее выражение, связывающее забойное и устьевое (избыточное) давления

$$P_{0_{заб}} = P_{0_{изб}} + \frac{H\gamma_{ср}}{100}, \qquad (37)$$

где $P_{0_{заб}}$ — статическое забойное давление; $P_{0_{изб}}$ — статическое избыточное давление; H — высота столба воды в скважине; $\gamma_{ср}$ — средняя плотность воды в стволе скважины. При этом $\gamma_{ср} = (\gamma_{пл} + \gamma_{ст})/2$, где $\gamma_{пл}$ — плотность воды в пластовых условиях; $\gamma_{ст}$ — плотность воды у устья простаивающей скважины.

При пуске скважины по мере прогревания окружающих пород в скважине устанавливается новый температурный режим, зависящий главным образом от дебита и диаметра скважины. Опыт исследований в Западной Сибири и других районах страны показал, что уже при сравнительно небольших дебитах (400—500 м³/сут) устьевая температура быстро стабилизируется и в дальнейшем остается практически постоянной.

Учитывая сказанное, можно записать следующее выражение для определения забойного давления в процессе работы скважины

$$P_{заб} = P_{изб} + \frac{H\gamma_{ср}}{100}, \qquad (38)$$

где $\gamma_{ср} = (\gamma_{дин} + \gamma_{пл})/2$; $P_{заб}$ — текущее забойное давление; $P_{изб}$ — текущее избыточное (устьевое) давление; $\gamma_{дин}$ — плотность воды на устье изливающей скважины в момент определения забойного давления. Отсюда выражение для определения понижения забой-

ного давления $\Delta P_{заб}$ через величину устьевой депрессии $\Delta P_{изб}$ будет иметь вид

$$\Delta P_{заб} = \Delta P_{изб} + \frac{H}{200}(\gamma_{ст} - \gamma_{дин}). \quad (39)$$

Из выражения (39) видно, что при определенных условиях: высокой проницаемости пород, большой величине H и разности $\gamma_{ст} - \gamma_{дин}$ — депрессия устьевого давления может оказаться отрицательной, и скважина, статический уровень которой был ниже поверхности земли, после возбуждения может фонтанировать (явление термолифта).

Понижение напора, приведенное к пластовым условиям $S_{пл}$, выражается следующим образом:

$$S_{пл} = \frac{100\,\Delta P_{заб}}{\gamma_{пл}} = \frac{100\,\Delta P_{изб}}{\gamma_{пл}} + H\frac{\gamma_{ст} - \gamma_{дин}}{2\gamma_{пл}}. \quad (40)$$

В случае отсутствия самоизлива понижение напора в пластовых условиях определяется по формуле

$$S_{пл} = \frac{H_0\gamma_{ср}}{\gamma_{пл}} - \frac{H'\gamma_{ср}}{\gamma_{пл}},$$

где H_0 — столб воды в скважине в статических условиях; H' — то же, при работе скважины.

Преобразуя выражение (40) с учетом зависимостей (37) и (38), получим

$$S_{пл} = S_{уст}\frac{\gamma_{пл} + \gamma_{дин}}{2\gamma_{пл}} + \frac{H_0}{2}\frac{\gamma_{ст} - \gamma_{дин}}{\gamma_{пл}}. \quad (41)$$

Учитывая, что $\gamma_{пл}$ и $\gamma_{дин}$ весьма близки по значениям, так как очень близки температуры, можно с точностью до 1 % принять $(\gamma_{ст} + \gamma_{дин})/2\gamma_{пл} \approx 1$.

Отсюда

$$S_{пл} = S_{уст} + \frac{H_0}{2}\frac{\gamma_{ст} - \gamma_{дин}}{\gamma_{дин}}, \quad (42)$$

где $S_{уст}$ — понижение уровня, замеренное на устье скважины.

Формулы (41) и (42) позволяют определить понижение забойного давления или напора по результатам замеров на устье скважин независимо от того, установился температурный режим в ней, или нет.

В табл. 63 приведены значения дополнительной величины понижения напора (в пластовых условиях) $\left(\Delta S = \frac{H_0}{2}\frac{\gamma_{ст} - \gamma_{дин}}{\gamma_{дин}}\right)$ по сравнению с замеренными на устье понижениями $S_{уст}$ для условий Тюменского месторождения подземных вод.

Во многих случаях величины $\Delta S_п$ и $S_{уст}$ оказываются не только соизмеримыми, но и весьма близкими между собой. Поэтому погрешность в определении параметров по формулам установившегося движения может быть очень велика (табл. 64).

Таблица 63

Расчетные величины поправок к понижению уровня

$t°_{ст}$	$t_д$	$\gamma_{ст}$	$\gamma_{дин}$	$\gamma_{ст}-\gamma_{дин}$	ΔS (в м) при H, м	
					1000	1600
3	50		1,0016	0,0139	6,9	11,1
	55		0,9993	0,0162	8,1	13
4	60	1,0155	0,9967	0,0188	9,4	15
	65		0,9948	0,0207	10,4	16,6
	70		0,9928	0,0227	11,3	18,1
	50		1,0016	0,0128	6,4	10,2
	55		0,9993	0,0151	7,5	12,1
10	60	1,0144	0,9967	0,0177	8,8	14,2
	65		0,9948	0,0196	9,8	15,7
	70		0,9928	0,0216	10,8	17,3
	50		1,0016	0,0109	5,5	8,7
	55		0,9993	0,0132	6,6	10,5
20	60	1,0125	0,9967	0,0158	7,9	12,6
	65		0,9948	0,0177	8,9	14,2
	70		0,9928	0,0197	9,8	15,8

С учетом всех поправок понижения давления и уровня воды в скважине могут быть выражены формулами

$$\Delta P_{пл} = \Delta P_{уст} + \frac{S_г\gamma}{100} + \frac{S_{t_0}\gamma}{100} - \frac{S_{п.н}\gamma}{100} + \frac{2\pi km}{Q}\ln\frac{r_c'}{r_0}; \qquad (43)$$

$$S_{пл} = S_{уст} + S_г + S_{t_0} = S_{п.н} + \frac{2\pi km}{Q}\ln\frac{r_c'}{r_0}. \qquad (44)$$

При откачке с постоянным дебитом величины $S_{п.н}$ и $2\pi km/Q \times \ln r_c'/r_0$ являются постоянными. Следовательно, приращение понижения, используемое при оценке параметров, выразится так:

$$\Delta S_{пл} = \Delta S_{уст} + S_г + \Delta S_{t_0},$$

где $\Delta S_г = S_{г_2} - S_{г_1}$; $\Delta S_{t_0} = S^0_{t_2} - S^0_{t_1}$; $S_{г_2}$ и $S_{г_1}$ — поправки к понижению на счет выделяющегося газа при давлениях на устье-$S^0_{t_2}$ и $S^0_{t_1}$ — температурные поправки к понижению при устревых температурах $t_2{}^0$ и $t_1{}^0$.

При стабилизации температуры на устье исчезает и соответствующий член в формулах (43) и (44).

Из приведенных выражений следует, что если пластовая вода содержит растворенный газ, то темп снижения устьевого давления по сравнению с забойным будет существенно замедленным. Если не учитывать это явление, то величины водопроводимости окажутся завышенными. Остальные дополнительные члены формул (43) и (44) существенного влияния на этот показатель не имеют, однако их следует учитывать при расчетах коэффициента пьезопроводности и приведенного радиуса, вводя соответствующие поправки.

Таблица 64

Результаты расчета коэффициента фильтрации (в м/сут) с учетом и без учета разности температур

Номер скважины	Без учета разности температур	С учетом разности температур
8-РГ	1,30	0,76
10-РГ	0,40	0,28
12-РГ	1,70	0,54
14-РГ	1,48	0,18
Среднее	1,22	0,44

Описанные явления, а также индивидуальные конструктивные особенности и техническое состояние каждой глубокой скважины значительно затрудняют интерпретацию графиков изменения пластовой депрессии, построенных по результатам измерения устьевых давлений. В некоторых случаях форма преобразованных графиков настолько сложна, что не позволяет с уверенностью выбрать участок, характеризующий падение пластового давления, вызванное работой скважины. Надежным критерием для определения правильности найденной величины водопроводимости является соответствие ее начальному удельному дебиту. Как известно, водопроводимость находится в прямой зависимости от удельного дебита гидродинамически совершенной скважины. Однако выше указывалось, что степень несовершенства скважин определяется, с одной стороны, конструкцией и положением фильтра относительно эксплуатируемого пласта и, с другой — состоянием прифильтровой зоны. В связи с этим целесообразно использовать зависимость водопроводимости от удельных дебитов по тем скважинам, по которым определение этих величин не вызывает затруднений. При этом в качестве удельного дебита следует использовать не фактический удельный дебит, а приведенный к условиям эквивалентной совершенной скважины с учетом всех указанных выше поправок. Согласно уравнению Дюпюи.

$$km = 0{,}366q \cdot \lg (r_к / r_с). \qquad (45)$$

Это же уравнение для эквивалентной по дебиту совершенной скважины запишется в виде

$$km = 0{,}366q \lg (r_к / r_с'), \qquad (46)$$

где $r_к$ — приведенный радиус влияния, рассчитанный по формуле

$$r_к = 1{,}5\sqrt{at}.$$

Выражение для приведенного удельного дебита получим делением зависимости (45) на (46)

$$q_0 = q\frac{\lg r_к - \lg r_c'}{\lg r_к - \lg r_c},$$

где q — фактический удельный дебит скважины на время t от начала откачки с учетом поправок на газ, температуру и потери напора в трубах; q_0 — приведенный удельный дебит; r_c' — приведенный радиус эквивалентной совершенной скважины.

Глава 8

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Картографирование является общепризнанным методом изучения и отображения гидрогеологических условий. Несмотря на длительность развития и совершенствования методов гидрогеологического картографирования, до настоящего времени нет единых принципов составления унифицированной легенды для гидрогеологических карт общего характера. Гидрогеологическая карта пока еще не обладает всей полнотой информации о закономерностях формирования и распространения подземных вод, многообразии сложных процессов в системе вода — порода, количественном выражении этих процессов, характеризующем динамику их проявления. К сожалению, до настоящего времени при общем гидрогеологическом картографировании отсутствует общепринятая стратификация; окончательно не разработаны единые принципы выделения водоносных горизонтов; большие трудности возникают при сопоставлении гидрогеологических разрезов смежных гидрогеологических структур; в основе расчленения геологического разреза с выделением горных пород по характеру и степени водоносности лежит практически только литолого-стратиграфический принцип. Между тем, гидрогеологическая стратификация требует совершенствования. Не вызывает сомнений, что помимо литолого-стратиграфических признаков гидрогеологическая стратификация должна учитывать также условия формирования водовмещающих и водоупорных горных пород, особенности геолого-тектонического развития района (особенности формирования и развития гидрогеологической структуры) и др.

Вопросы гидрогеологического картирования нашли отражение в трудах многих гидрогеологов страны: М. Е. Альтовского, Б. Н. Архангельского, С. С. Бондаренко, И. К. Зайцева, Н. К. Игнатовича, Б. Ф. Маврицкого, Н. А. Маринова, М. Р. Никитина, Н. В. Роговской, А. С. Рябченкова, А. В. Щербакова, Л. А. Яроцкого и др. Несмотря на это, многое еще остается спорным, и дискуссия по

вопросам гидрогеологического картографирования продолжается до настоящего времени.

М. Р. Никитин отмечает, что первой и основной причиной является чрезвычайная сложность объекта картографирования: гидрогеологических условий изучаемой территории, или системы «вода — горная порода». Поэтому понятие об этих условиях охватывает весьма много явлений (распространение, движение подземных вод, их состав, свойства, изменения во времени и связи с условиями залегания, составом и свойствами горных пород, с поверхностными водами и факторами; многоэтажное залегание горизонтов подземных вод в пределах артезианских бассейнов и др.). Отсюда вытекает вторая причина — отсутствие унифицированной легенды к гидрогеологической карте, связанное с отсутствием в гидрогеологии общепринятой классификации, которая отвечала бы целям картографирования в той же степени, как отвечают этому международная геохронологическая шкала (для построения геологических карт), генетическая классификация почв (для построения почвенных карт) и т. д. Третьей причиной является многообразие взаимосвязанных элементов гидрогеологических условий, требующих отражения на карте, и стремление к охвату при картографировании всего гидрогеологического разреза, характеризующегося частым чередованием многих водоносных горизонтов и водоупорных толщ.

Анализ состояния гидрогеологического картографирования в СССР и за рубежом дан в работе Н. В. Роговской [43], обобщающей опыт составления гидрогеологических карт различного назначения и масштаба. Автор отмечает, что несмотря на сохраняющуюся дискуссионность вопроса о содержании карт, все они четко делятся на карты: 1) общие гидрогеологические; 2) специальные; 3) оценочные для планирования и проектирования.

Общее гидрогеологическое картографирование производится с целью изучения гидрогеологических условий, познания гидрогеологических закономерностей распространения и формирования подземных вод, направления их движения и процессов водообмена, условий питания и разгрузки и т. д. К картам общего назначения Н. В. Роговская относит: 1) карты элементов водного баланса суши и карты водных ресурсов; 2) карты условий распространения и залегания подземных вод; 3) карты условий формирования подземных вод. Отметим, что к группе 3 относятся карты: а) гидродинамической структуры бассейнов подземных вод; б) гидрогеохимической структуры бассейнов подземных вод; в) гидрогеотермической структуры бассейнов подземных вод. Основой общего гидрогеологического картографирования является геолого-структурный принцип гидрогеологического районирования, основанный на разграничении платформенных и геосинклинальных областей и выделении в складчатых областях структурных этажей, а в платформенных — чехлов и фундаментов разного геологического возраста.

Специальные карты составляются обычно для практических целей использования подземных вод: водоснабжения, лечебных,

теплофикации, захоронения вредных промышленных стоков, добычи гидроминерального сырья и т. д. Перечень этой группы карт постоянно увеличивается в связи с расширением сферы использования подземных вод в народном хозяйстве.

Карты распространения минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод и их ресурсов относятся к специальным гидрогеологическим картам отраслевого назначения. Картографирование таких вод в соответствии с задачами их изучения и оценки должно проводиться с целями: 1) вскрыть и изучить закономерности их распространения, закономерности изменения концентраций в водах редких и рассеянных элементов и специфических компонентов; 2) изучить динамику подземных вод и ее роль в формировании ресурсов и состава минеральных, термальных и промышленных вод; 3) оценить эксплуатационные ресурсы и запасы различных типов подземных вод в пределах гидрогеологических районов их распространения; 4) выявить наиболее перспективные участки для практического освоения месторождений по сумме гидрогеологических, технико-экономических и природных факторов. Вместе с тем, картографирование вод производится с целью решения вопросов гидрогеохимии и общей гидрогеологии и должно способствовать разработке генетической классификации этих вод, типизации месторождений и изучению условий формирования их химического состава.

К настоящему времени в СССР накоплен большой опыт картографирования глубоких подземных вод и их месторождений.

Обобщение материалов многих специалистов позволило изучить важнейшие гидрогеологические и газохимические характеристики разнообразных минеральных вод, выявить основные закономерности их распространения. Карты минеральных вод отдельных регионов страны и территории СССР в целом до недавнего времени содержали в основном качественную характеристику минеральных вод и условий их залегания. В настоящее время эти карты более полно характеризуют подземные воды. На них отображены закономерности распространения различных типов минеральных вод, их минерализация, химический состав, температура, наличие специфических компонентов, некоторые геолого-тектонические условия залегания и распространения. К числу таких относятся Карта минеральных лечебных вод СССР масштаба 1 : 4 000 000 под редакцией В. В. Иванова, Карта минеральных вод СССР масштаба 1 : 2 500 000 под редакцией Л. А. Яроцкого. В 1984 г. впервые издана и демонстрировалась на выставке «Геоэкспо-84» XXVII Международного геологического конгресса Карта прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов основных типов минеральных вод СССР масштаба 1 : 5 000 000 под редакцией Г. С. Вартаняна. На карте отражены результаты региональной оценки суммарных ресурсов, т. е. прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов, трех основных типов минеральных вод: 1) углекислых вод разнообразного ионного состава и минерализации; 2) азотных термальных вод и 3) хлоридных натриевых (и кальциевых) преимущественно мета-

новых и азотно-метановых вод, содержащих йод и бром. Показано также распространение других типов подземных минеральных вод (сероводородных, радоновых и др.), размещение разведанных месторождений различных типов минеральных вод и состояние целевого их использования.

Развитие региональных и геологоразведочных работ, направленных на расширение использования в народном хозяйстве глубинного тепла земли, привело к необходимости изучения и картографического отображения закономерностей распространения и ресурсов термальных подземных вод. В 1965 г. была издана под редакцией Б. Ф. Маврицкого обзорная специальная Карта термальных вод СССР масштаба 1 : 2 500 000, на которой отражены закономерности распространения и формирования термальных вод различной температуры, химического состава и минерализации в пределах глубин, достигнутых к тому времени буровыми скважинами. Эта карта позволила выявить наиболее перспективные районы развития термальных вод, представляющих интерес для их практического освоения. В 1983 г. издана Карта-схема перспектив использования термальных вод СССР масштаба 1 : 1 500 000 под редакцией Б. Ф. Маврицкого. Наиболее крупной работой последних лет явилось составление изданного в 1985 г. Атласа карт ресурсов термальных вод СССР под его же редакцией (с объяснительной запиской). Атлас включает 17 карт, в том числе Карту термальных вод СССР масштаба 1 : 10 000 000 и ряд гидрогеотермических разрезов к ней, Карту потенциальных ресурсов термальных вод СССР масштаба 1 : 10 000 000, гидрогеотермические карты и карты эксплуатационных ресурсов термальных вод основных водоносных комплексов Западно-Сибирской, Скифской и Туранской платформенных областей, а также карты термальных вод и парогидротерм Камчатки и Курильских островов. В Атласе нашли отражение все новейшие данные по гидрогеологии, гидрогеотермии, геологии и тектонике СССР.

Картографирование подземных промышленных вод первоначально развивалось в направлении изучения закономерностей их распространения, характера изменения их минерализации и химического состава по площади артезианских бассейнов и с глубиной; а также изучения закономерностей изменения в промышленных водах полезных компонентов, в первую очередь йода и брома. Дальнейший анализ показал, что высокие концентрации полезных компонентов являются важным, но не единственным условием их промышленного освоения (см. главу 2). Поэтому дальнейшие работы по картографированию подземных промышленных вод проводились с целью не только изучения закономерностей их распространения, но также количественной оценки их ресурсов и эксплуатационных запасов. Так, в 1966—1970 гг. производственными и научно-исследовательскими организациями Мингео СССР под научно-методическим руководством и при участии ВСЕГИНГЕО было выполнено картографирование прогнозных эксплуатационных запасов подземных промышленных вод СССР. Региональная оцен-

ка прогнозных эксплуатационных запасов промышленных вод была впервые выполнена по сумме гидрогеохимических и гидродинамических показателей с учетом геолого-экономических условий эксплуатации и использования этих вод.

Расширение круга извлекаемых из подземных промышленных вод компонентов обусловило необходимость изучения и картографирования закономерностей распространения в пределах водонапорных систем также лития, рубидия, цезия, стронция и бора. В 1985 г. ВСЕГИНГЕО по материалам производственных и научно-исследовательских организаций завершены региональная оценка и составление карты эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных промышленных вод СССР. Полученные материалы являются надежной основой планирования геологоразведочных работ и размещения производственных мощностей по добыче рассеянных элементов, редких металлов и минеральных солей.

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОД

Для достижения поставленных целей и решения общих и специальных задач, связанных с изучением и оценкой перспектив использования промышленных вод, предложено составить три вида карт: 1) гидрогеохимического распространения промышленных вод в различных водоносных комплексах; 2) динамики подземных вод и параметров водоносных комплексов или горизонтов; 3) прогнозных эксплуатационных запасов промышленных подземных вод. Цели, задачи и основные элементы картографирования указаны в табл. 65.

Масштаб картографирования промышленных вод и их запасов определяется степенью гидрогеологической изученности отдельных районов страны и размерами изучаемой территории. Ниже приведены некоторые сведения о масштабах картографирования, принятых при выполнении законченных к настоящему времени работ по региональной оценке эксплуатационных запасов подземных промышленных вод СССР (по гидрогеологическому или административному району) с использованием излагаемых принципов и методики:

Волго-Камский бассейн	1 : 1 500 000	Западно-Туркменский бассейн	1 : 500 000
Западно-Сибирский бассейн	1 : 2 500 000	Украинская ССР	1 : 1 000 000
Ангаро-Ленский бассейн	1 : 1 500 000	Молдавская ССР	1 : 1 000 000
Северное Предкавказье	1 : 500 000	Прибалтика	1 : 1 000 000
Прикуринский бассейн	1 : 200 000		

Подобный подход к картографированию связан с необходимостью стратификации гидрогеологического разреза в каждом изучаемом районе. Гидрогеологическое расчленение разреза отличается особенностями в каждом бассейне промышленных вод и определяется масштабом картографирования. А. С. Рябчиков занимал-

Таблица 65

Виды карт при региональном изучении и оценке месторождений подземных промышленных вод

Карты	Цели и задачи картографирования	Основные элементы картографирования
Гидрогеохимические распространения промышленных вод в различных обособленных водоносных комплексах	Изучение гидрогеохимических закономерностей распространения промышленных вод и связи этих закономерностей с общей гидрогеохимической зональностью и литолого-фациальными особенностями водовмещающих пород; изучение условий формирования подземных вод	Границы гидрогеологического района и распространения водоносного комплекса; минерализация и химический (и газовый) состав подземных вод; концентрации в подземных водах полезных компонентов, сведения о количественном содержании других редких и рассеянных элементов; литолого-фациальная характеристика водовмещающих пород; основные скважины или группы скважин
Динамики подземных вод и параметров водоносных комплексов	Изучение закономерностей изменения параметров водовмещающих пород; анализ распределения пьезометрических напоров; оценка направления и интенсивности подземного стока, взаимосвязи водоносных горизонтов и комплексов; схематизация гидрогеологических условий для гидродинамических расчетов аналогового и математического моделирования	Границы гидрогеологического района и распространения водоносного комплекса; водопроводимость пород; приведенные пьезометрические напоры; температура подземных вод; области питания и создания напора, разгрузки; области возможного самоизлива воды из скважин (фонтанирования)
Прогнозных эксплуатационных запасов промышленных вод водоносных комплексов	Изучение распространения различных типов промышленных вод и размеров месторождений; оценка эксплуатационных запасов в пределах водозаборов и месторождений; разработка рекомендаций по комплексному использованию промышленных вод и размещению производственных мощностей по добыче рассеянных элементов и редких металлов; планирование и проектирование геологоразведочных работ	Границы гидрогеологического района и распространения водоносного комплекса; распространение основных типов промышленных вод; контуры месторождений; эксплуатационные, перспективные и прогнозные участки водозаборов; эксплуатационные балансовые и забалансовые запасы промышленных вод; распространение других редких и рассеянных элементов

ся вопросами стратификации гидрогеологического разреза и определением основных его таксономических единиц. Эти вопросы также изложены в методических руководствах по проведению гидрогеологической съемки. Принимая во внимание рекомендации, содержащиеся в указанных работах, необходимость составления гидрогеологических карт с учетом стратиграфии и литологии водовмещающих пород, в настоящей книге приняты следующие основные единицы гидрогеологической стратификации для карт промышленных вод: 1) водоносный горизонт; 2) водоносный комплекс; 3) водоупорный комплекс (или горизонт) — в общепринятом для этих единиц понимании.

Гидрогеохимические карты распространения подземных промышленных вод в различных водоносных комплексах составляются для достаточно крупных артезианских бассейнов или водонапорных систем. Гидрогеохимические карты дают нам представление о границах гидрогеологического района (бассейн промышленных вод); границах распространения водоносного комплекса (или горизонта) в пределах гидрогеологического района; литолого-фациальной характеристике водовмещающих пород; основных скважинах или группе скважин; минерализации и химическом составе подземных вод; химическом составе растворенных газов; концентрации в подземных водах йода, брома, бора, лития, стронция, цезия, рубидия и других компонентов, а при площадном их распространении — участках с повышенным содержанием микроэлементов.

Границы распространения водоносных комплексов могут совпадать с границами гидрогеологического района. Однако часто этого не наблюдается из-за выклинивания или фациального замещения водоносных пород. Выявление и отражение этих границ необходимо показать на карте для правильной схематизации граничных гидрогеологических условий при оценке эксплуатационных запасов подземных вод.

Литолого-фациальная характеристика пород должна быть отражена на картах сжато: указываются только основные литологические типы отложений (пески, песчаники, известняки, глинисто-песчаные, глинисто-карбонатные отложения и т. д.) и фациальные условия осадконакопления (морские, лагунные, прибрежноморские, континентальные). Сопоставление литолого-фациальных особенностей отложений с характером приуроченных к ним подземных вод позволяет уточнить представление о путях формирования этих вод, устойчивости закономерностей изменения их минерализации и химического состава; увязать параметры водоносных пород с их особенностями.

Основными показателями, которые даны на гидрогеохимических картах, являются: минерализация, химический состав воды (и состав растворенных в них газов), концентрации йода, брома, бора, стронция, цезия, рубидия, лития, калия, магния и т. д. Поэтому цветом на таких картах целесообразно показывать минерализацию и химический состав подземных вод, учитывая, что в зависимости от гидрогеологических условий изучаемой территории мо-

гут быть приняты различные градации значений минерализации и предельные показатели химического состава подземных вод.

Например, в пределах Западно-Сибирского артезианского бассейна минерализация и состав подземных вод на значительных территориях изменяются незначительно. Здесь для анализа гидрогеохимических закономерностей целесообразно выделять зоны распространения подземных вод различной минерализации и состава, используя дробную градацию. Наоборот, в районах Волго-Уральской области, где минерализация и состав подземных вод палеозойских отложений изменяются весьма широко, нет необходимости в дробной градации. При этом на карте следует показать гидрогеохимическую зональность.

По газовому составу, учитывая особенности глубоких подземных вод, целесообразно выделить следующие группы: углекислые, азотные, с углеводородными газами, с газами сложного состава (углеводородно-азотные, азотно-метановые, углекисло-сероводородные и т. д.). В особую группу выделяются подземные воды, для которых характерно наличие сероводорода, вследствие их большой агрессивности по отношению к металлу и высокой токсичности.

Следует отметить различие в характере закономерностей распространения редких элементов. Концентрации брома и стронция обычно тесно увязываются с общей минерализацией подземных вод. Величины их удобно показывать в виде изолиний концентраций. Для йода и бора таких четких закономерностей не наблюдается, в связи с чем приходится ограничиваться выделением зон распространения подземных вод с теми или иными концентрациями.

Карты динамики подземных вод и параметров водоносных комплексов должны включать элементы гидрогеологических условий, необходимые в качестве исходных данных для подсчета запасов подземных вод. На этих картах показываются: границы гидрогеологического района (бассейна йодо-бромных вод); границы распространения водоносного комплекса или горизонта; водопроводимость пород и ее изменение в пределах территории распространения того или иного водоносного комплекса (горизонта); глубина залегания кровли водоносного комплекса (горизонта); изолинии приведенных пьезометрических напоров (приведенных давлений); область питания, создания напора и разгрузки подземных вод, а также районы выхода водовмещающих пород на поверхность; области возможного самоизлива (фонтанирования скважин); скважины или группы скважин; температура подземных вод.

Карты рассматриваемого типа должны включать все основные данные, необходимые для гидродинамических расчетов водозаборов в пределах месторождения промышленных вод. Основными картируемыми элементами в данном случае являются водопроводимость пород и приведенные пьезометрические напоры (пластовые давления). Выбор пределов изменения водопроводимости зависит от густоты сети опорных водопунктов, изученности этого параметра и изменчивости его в пределах картографируемой тер-

ритории. Для оценки водопроводимости пород, помимо результатов испытания скважин, должны быть использованы материалы лабораторных исследований образцов керна, результаты промыслово-геофизических исследований в скважинах, методы корреляции разрезов скважин и т. д.

Распределение приведенных пьезометрических напоров характеризует направление и интенсивность подземного стока. Расчеты и построение карт таких напоров целесообразно выполнять в соответствии с методикой, изложенной в данной работе.

Глубина залегания водоносного комплекса имеет значение для оценки перспектив использования промышленных вод, выбора предельных допустимых понижений уровня при подсчете эксплуатационных запасов. Выявление и нанесение на карту областей питания (создания напора) и разгрузки подземных вод необходимо с целью схематизации гидрогеологических условий месторождений и гидродинамических расчетов. Изолинии пластовых температур проводятся с учетом известных методов обработки результатов их измерений.

Карты прогнозных эксплуатационных запасов промышленных вод составляются на основе карт гидрогеохимических, а также карт параметров и динамики подземных вод. При этом принимаются во внимание гидрогеологические и технико-экономические расчеты. На таких картах отражаются: границы гидрогеологического района (бассейна) и распространения пород водоносного комплекса (горизонта); распространение основных типов промышленных подземных вод (йодных, бромных, йодо-бромных, бороносных, литиевых и т. д.) и контуры месторождений этих вод; распространение непромышленных иодных, бромных, иодо-бромных и других типов вод, содержащих повышенные концентрации редких и рассеянных элементов; распространение пресных и соленых вод, которые по принимаемой в настоящей работе классификации не могут рассматриваться как специфические минеральные или промышленные по содержанию редких и рассеянных элементов; изменение концентраций в подземных водах основных промышленных компонентов; участки или районы (если таковые имеются), характеризующиеся повышенными концентрациями йода, брома, бора, лития, стронция, цезия, рубидия и др.; эксплуатационные и перспективные участки водозаборов в пределах месторождений промышленных вод; эксплуатационные и прогнозные запасы промышленных вод, а также запасы полезных компонентов.

Границы месторождения (площади распространения подземных промышленных вод) устанавливаются с учетом минимальных промышленных концентраций полезных компонентов, обоснованных технико-экономическими расчетами. Выявленные особенности промышленных подземных вод и условия их эксплуатации позволяют производить оценку запасов на конкретных участках. В соответствии со степенью изученности гидрогеологических условий эксплуатационные участки могут быть разрабатываемыми, специально разведанными и перспективными, для которых исходные расчет-

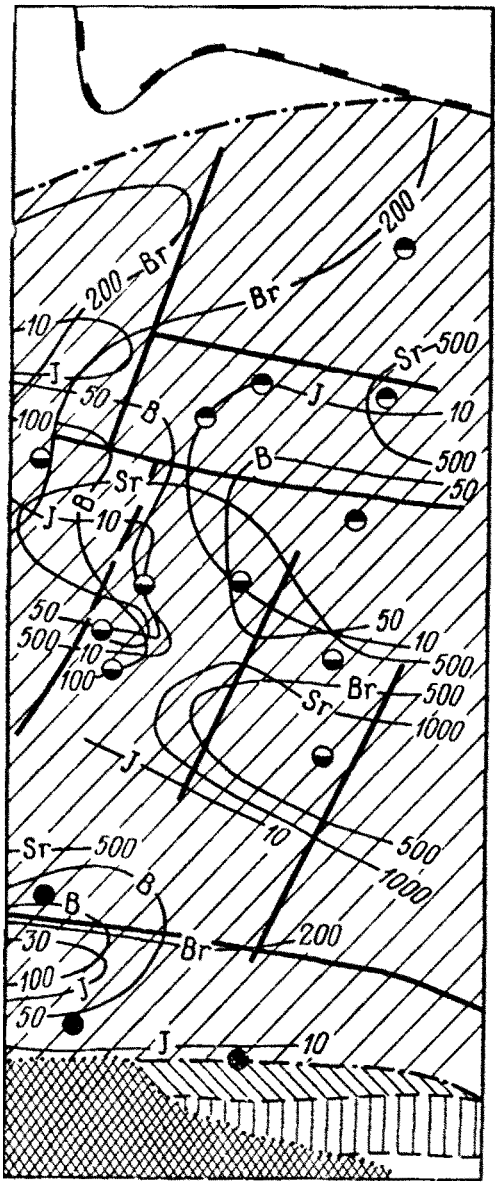


Рис. 40. Фрагмент гидрогеохимической карты распространения йода, брома, бора и стронция в подземных промышленных водах водоносного комплекса.

Площади распространения различных типов подземных вод: *1* — хлоридных кальциево-натриевых; *2* — хлоридных натриевых; *3* — сульфатно-хлоридных кальциево-натриевых; изолинии концентраций микроэлементов (в мг/л): *4* — йода, *5* — брома, *6* — бора, *7* — стронция; газовый состав подземных вод: *8* — углеводородный, *9* — углеводородно-углекислый, *10* — углеводородно-азотный; границы: *11* — тектонического региона, *12* — гидрогеологического бассейна, *13* — распространения водоносного комплекса, *14* — распространения подземных вод различного состава; *15* — районы выхода водоносных пород на поверхность; *16* — тектонические нарушения

ные данные для оценки запасов определяются по данным опытных работ на скважинах, или эти данные устанавливаются путем экстраполяции и интерполяции имеющихся материалов на изученной части месторождения.

В некоторых случаях, особенно для месторождений платформенного типа, целесообразно показывать площади перспективные, мало перспективные и неперспективные (большая глубина залегания водоносных пород, малая их водообильность и т. д.).

Картографирование подземных промышленных вод завершается составлением сводной карты месторождений и прогнозных эксплуатационных запасов гидроминерального сырья. Эта карта дает представление о размещении на территории СССР месторождений промышленных вод, их особенностях, отражает масштабы рас-

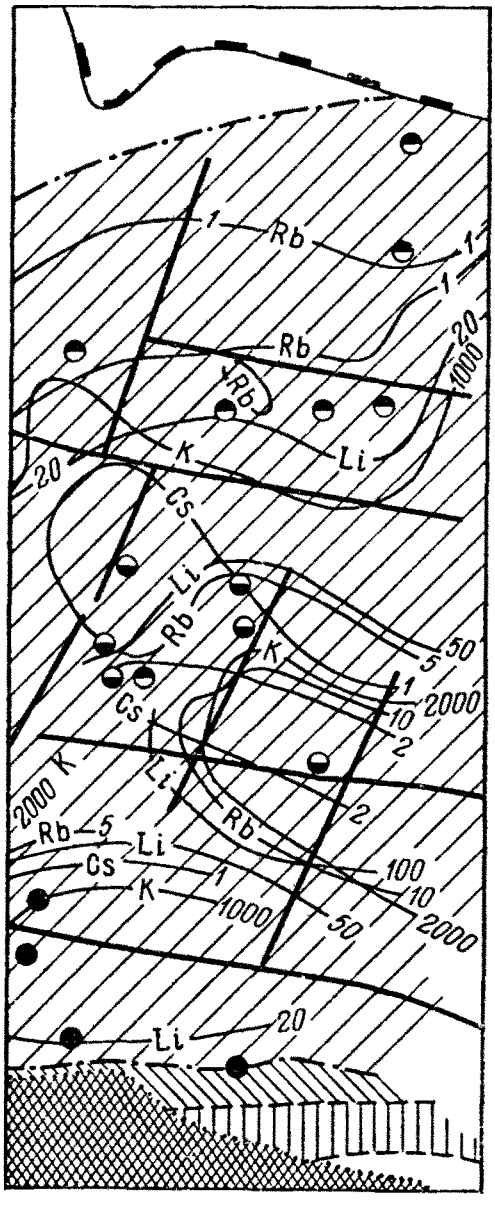


Рис. 41. Фрагмент гидрогеохимической карты распространения лития, рубидия, цезия и калия в подземных промышленных водах водоносного комплекса.

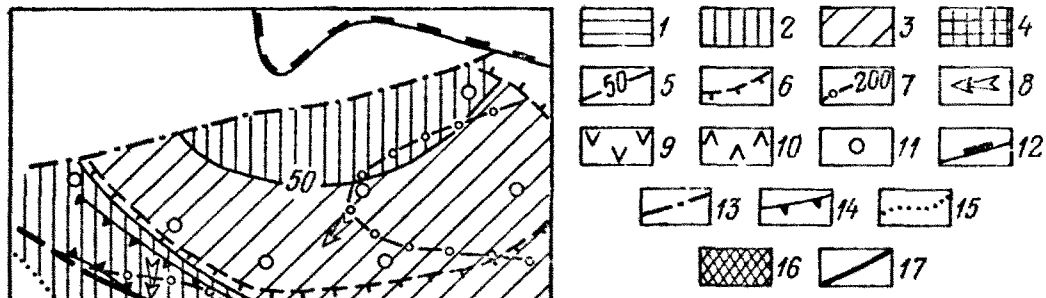
Площади распространения различных типов подземных вод: *1* — хлоридных кальциево-натриевых, *2* — хлоридных натриевых, *3* — сульфатно-хлоридных кальциево-натриевых; изолинии концентрации микроэлементов (в мг/л): *4* — лития, *5* — рубидия, *6* — цезия, *7* — калия; газовый состав подземных вод: *8* — углеводородный, *9* — углеводородно-углекислый, *10* — углеводородно-азотный; *11* — выходы пород водоносного комплекса на поверхность; границы: *12* — тектонического региона, *13* — гидрогеологического бассейна, *14* — распространения водоносного комплекса, *15* — распространения подземных вод различного состава; *16* — тектонические нарушения

пространения этих вод и размеры их эксплуатационных запасов.

Принципы картографирования подземных промышленных вод отражены на рис. 40—43. С целью упрощения карт и уменьшения их картографической нагрузки на гидрогеохимических картах не показан литолого-фациальный состав водовмещающих пород. Кроме того, гидрогеохимические построения выполнены раздельно для вод, содержащих литий и цезий.

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Содержание и масштаб карт подземных минеральных вод определяются их назначением. Обзорные карты (масштаб меньше



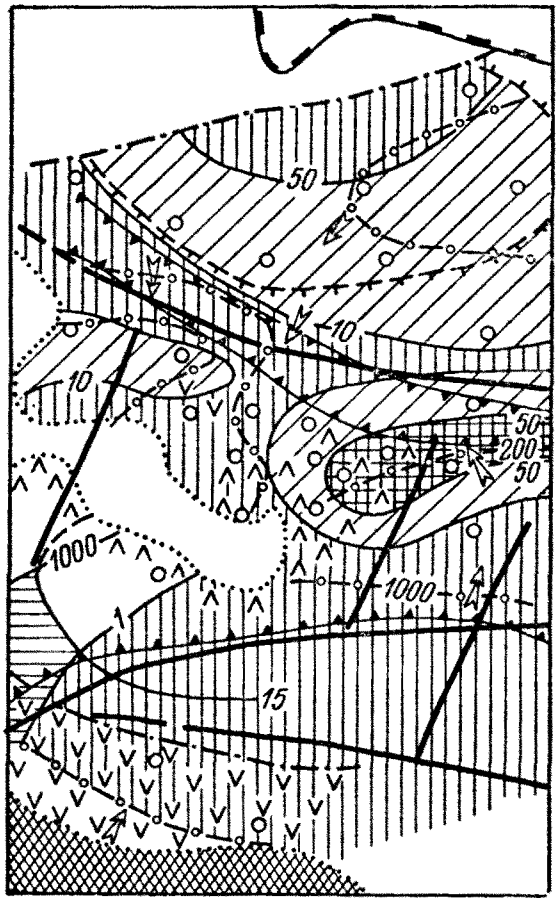


Рис. 42. Фрагмент карты динамики подземных вод и параметров пород водоносного комплекса.

Области с различной водопроводимостью пород в ($м^2$/сут): *1* — 1, *2* — от 1 до 10, *3* — от 10 до 50, *4* — 50; *5* — изолинии водопроводимости (в $м^2$/сут); *6* — граница областей самоизлива подземных вод из скважин; *7* — изолинии приведенных гидростатических уровней; *8* — направление движения подземных вод; области межпластовых перетоков: *9* — из нижнемелового комплекса в юрский, *10* — из юрского в нижнемеловой; *11* — скважина или группа скважин; границы: *12* — тектонического региона, *13* — гидрогеологического бассейна, *14* — основных геоструктурных элементов, *15* — распространения водоносного комплекса; *16* — районы выхода пород водоносного комплекса на дневную поверхность; *17* — тектонические нарушения

1 : 2 500 000) составляются в основном для всей территории СССР с целью решения задач перспективного планирования поисково-разведочных работ и освоения выявленных ресурсов минеральных вод. При современной изученности минеральных подземных вод такие задачи должны решаться только на основе количественных прогнозов их ресурсов в различных регионах страны. Главным элементом картографирования в этом случае является ресурсы минеральных подземных вод, определяемые на основе региональной оценки.

Региональные карты (масштаб 1 : 1 500 000—1 : 500 000), которые составляются для территорий республик, краев, областей, служат основой планирования для республиканских и различных территориальных органов. Различие обзорных и региональных карт заключается в степени детальности отображения имеющейся информации и соответственно степени обобщенности оценки ресурсов минеральных вод.

Таким образом, на основе обзорных и региональных составляются карты прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов минеральных вод. Карта должна отражать современное состояние и перспективы использования различных типов минеральных вод СССР. Разнообразие минеральных вод по составу, содержанию

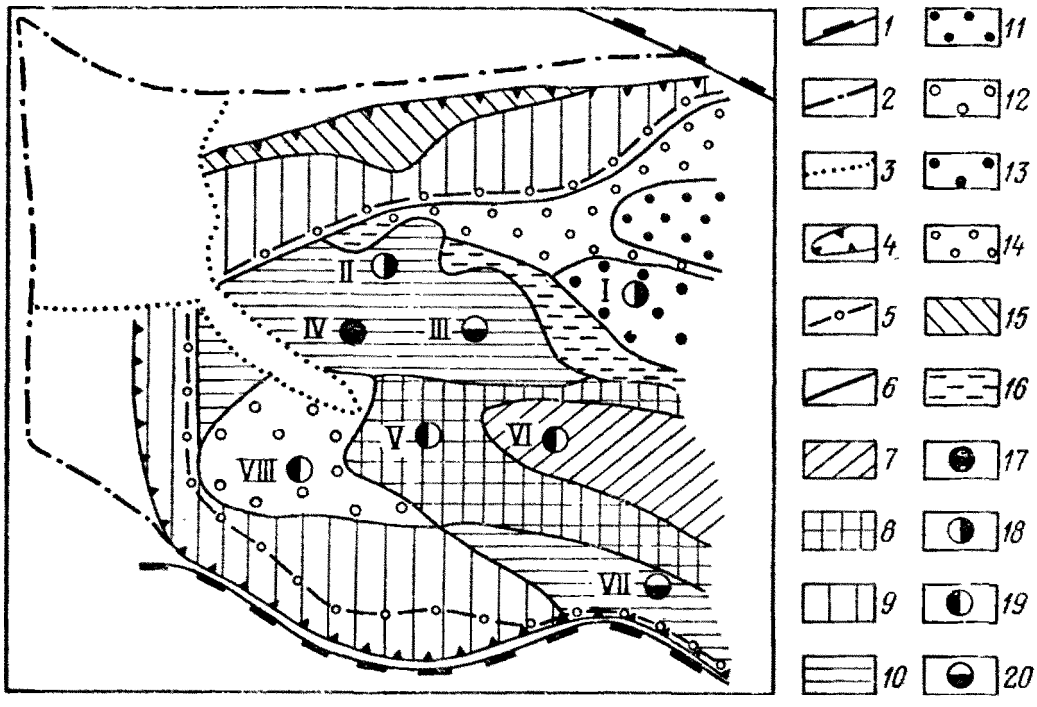


Рис. 43. Фрагмент карты прогнозных эксплуатационных запасов месторождения подземных промышленных вод.

Границы: *1* — провинции подземных промышленных вод, *2* — гидрогеологического района, *3* — распространение водоносного комплекса, *4* — месторождения подземных промышленных вод, *5* — балансовой части месторождения, *6* — распространения различных типов подземных промышленных вод; площадь распространения промышленных вод: *7* — литиево-рубидиевых бромно-борных стронциевых, *8* — литиево-рубидиево-цезиевых борных стронциевых, *9* — литиево-рубидиевых йодо-бромных, *10* — литиево-рубидиево-цезиевых борных, *11* — литиево-стронциевых, *12* — литиевых йодных, *13* — литиево-рубидиево-цезиевых йодных стронциевых, *14* — литиевых, *15* — литиево-рубидиевых, *16* — литиево-рубидиево-цезиевых; эксплуатационный участок (римские цифры слева — номер участка): *17* — разрабатываемый, *18* — разведанный, *19* — перспективный по данным поисково-разведочных работ (в том числе на нефть и газ), *20* — перспективный по экстраполяции и интерполяции гидрогеологических данных. Величина сектора внутри кружка соответствует концентрации промышленного ценного компонента

биологически активных компонентов так велико, что показать на карте ресурсы всех типов вод невозможно. При выборе типов вод, подлежащих картографированию, следует исходить из их практической ценности и распространенности. Основными типами минеральных вод при таком подходе являются: углекислые, азотные термы, йодные, йодо-бромные, бромные, сероводородные, радоновые. По возможности должны быть оценены ресурсы менее распространенных, но весьма ценных минеральных вод, содержащих специфические компоненты: борные, кремнистые, мышьяковистые, железистые и др.

Региональная оценка предусматривает определение потенциальных возможностей получения минеральных подземных вод в отдельных гидрогеологических районах или структурах. Такая оценка выполняется обобщенными методами, а полученные величины автоматически включают прогнозные ресурсы минеральных вод данного района и эксплуатационные запасы разведанных место-

рождений, сумма * которых и отображается на карте. Ресурсы подземных минеральных вод могут отображаться в виде: 1) суммарной величины ресурсов в пределах выделенной гидрогеологической единицы; 2) модулей ресурсов. Под модулем понимается количество воды, которое можно получить с 1 км^2 площади распространения водоносного комплекса (горизонта). В зависимости от масштаба карты выделяются гидрогеологические единицы, ресурсы которых и показываются на ней. Для обзорных карт — это обычно районы, реже области, региональных — подрайоны или районы. Оценке подлежат все водоносные горизонты (комплексы), содержащие минеральные воды, и по глубинам залегания перспективные для эксплуатации. Сложность гидрогеологических условий и наличие нескольких водоносных комплексов (горизонтов) с минеральными водами разных типов определяют необходимость составления серии вспомогательных карт, которая будет служить основой для карты прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов. Такими являются карты:

— гидрогеохимические для отдельных комплексов (горизонтов);

— гидродинамических параметров для отдельных комплексов (горизонтов);

— фактического материала.

В некоторых случаях целесообразно составить карты эффективных мощностей, литолого-фациальные, тектонических разломов и трещиноватости, а иногда и карты прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов минеральных вод для отдельных продуктивных водоносных комплексов (горизонтов). Ниже очень кратко изложим принципы и содержание упомянутых карт.

Гидрогеохимические карты отражают закономерности распространения минеральных вод различного типа, распределение их по газовому и химическому составам, содержанию специфических компонентов, условиям их формирования. Основной картографический знак — цвет — используется для показа минерализации и химического состава подземных вод горизонта (комплекса). Градации минерализации определяются конкретными пределами изменениями ее, а также требованиями практики их использования. В настоящее время Общесоюзным классификатором для унификации гидрогеологической информации определены градации минерализации воды (в г/л): 1—3, 3—10, 10—25, 25—35, 35—50, 50—150, >150. Следует заметить, что здесь отсутствуют некоторые важные для лечебной практики границы минерализации (5, 15), в то время как значения минерализации 3 и 25 г/л для минеральных вод с целью их лечебного использования необоснованы. Поэтому этот вопрос следует решить, согласовав его со всеми заинтересованными организациями.

Важной характеристикой выделения минеральных вод по их биологической активности является их газовый состав. По газово-

---

* Далее сумму будем называть ресурсами.

му составу выделяются: углекислые, азотные, метановые, радоновые и сероводородные. Воды относят к тому или иному газовому типу по преобладанию какого-либо газа. Могут выделяться смешанные типы. Минеральные воды, содержащие некоторые специфические компоненты: H_2S, As, Fe, органические вещества и др., обычно распространены локально, поэтому обычно выделяются контурами на фоне основного типа минеральных вод.

Минимальные содержания специфических компонентов, по которым минеральные воды относят к соответствующему типу, приведены в табл. 25. При оценке их следует иметь в виду, что эти содержания даны для воды с минерализацией до 15 г/л. Для более минерализованных вод предельное содержание определяется с учетом конкретной минерализации и необходимой степени ее разбавления. Химический состав подземных вод существенно зависит от литологического состава пород и условий осадконакопления, которые обобщенно отражены на гидрогеохимической карте, а при крайней сложности их — на специальной литолого-фациальной карте.

Особое внимание в складчатых областях обращается на тектонические нарушения, которые могут быть либо коллекторами минеральных растворов, либо экраном для потоков таких вод. Поскольку роль тектонических нарушений не всегда удается выяснить, на карте показываются две их разновидности: с выясненным и невыясненным гидрогеологическим значением, при этом первые подразделяются на водопроницаемые и водонепроницаемые. Целесообразно также выделить особым знаком тектонические нарушения, являющиеся путями разгрузки глубинных флюидов.

На карте проводятся также границы водоносных горизонтов или комплексов, опорные водопункты, очаги естественной разгрузки (современной и древней).

Гидродинамическая карта является основой для подсчета ресурсов минеральных вод. Методика такого подсчета существенно различна для платформенных и складчатых областей. Для платформенных областей на гидродинамической карте показывается прежде всего водопроводимость. Определяется она по данным не только опытного ее определения, но и материалов лабораторных исследований проницаемости и геофизического каротажа скважин. При этом косвенные способы установления водопроводимости должны применяться при условии корреляции их с данными опытно-фильтрационных работ. Важной характеристикой на этой карте является также и уровень (или напор) подземных вод по отношению к поверхности, а при переменной плотности подземных вод — еще и величины приведенных пьезометрических уровней, с помощью которых выделяются участки возможных межпластовых перетоков.

Не менее важна роль тектонических нарушений, определяющих те или иные гидродинамические граничные условия, а в складчатых областях во многих случаях обеспечивающих и ресурсы минеральных вод. Способ показа аналогичен принятому при состав-

лении гидрогеохимической карты. В складчатых областях определение и картографирование водопроводимости трещинных коллекторов — задача трудно выполнимая. Здесь внимание должно быть акцентировано на отображении прямых и косвенных характеристик тектонических нарушений (простирания, амплитуд, характера заполнителя, гидрогеологической роли), по возможности трещиноватости пород (густоты, раскрытости трещин и т. д.). Показываются все проявления подземных вод, связанных с тектоническими нарушениями, и их количественная характеристика (дебит, дебит для скважин, понижение, уровень воды).

Карта прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов предназначена для оценки ресурсов минеральных вод определенной территории с учетом всех горизонтов (комплексов) в пределах доступных для практического освоения глубин. Однако при наличии нескольких горизонтов, содержащих минеральные воды разного типа, возникает необходимость предварительного составления таких карт для каждого из горизонтов. На карте ресурсы показываются по типам минеральных вод в пределах выделенных для изученной территории гидрогеологических единиц. Поэтому цветом отображаются основные типы минеральных вод с границами их распространения.

При наличии в вертикальном разрезе нескольких типов минеральных вод методом просвечивания показываются два основных (с учетом запасов и практической ценности). Воды специфического состава, имеющие локальное распространение, можно изобразить границей и цветной штриховкой. В тех случаях, когда минерализация имеет принципиальное значение (в основном для соленых и рассольных вод), проводятся изолинии.

Ресурсы минеральных вод на погоризонтных картах показываются на платформах в виде их модулей (знаками), в складчатых областях — цифрами для дренажных систем и наложенных впадин (для каждой из них или группы в зависимости от масштаба карты). На итоговой карте отображаются результаты подсчета суммарных ресурсов минеральных вод определенного типа, содержащихся во всех горизонтах, представляющих практический интерес.

Наибольшая трудность заключается в выборе картографируемых типов и, соответственно, содержащих их водоносных комплексов, так как во многих районах в вертикальном разрезе выделяется несколько водоносных комплексов, содержащих различные минеральные воды, а картографически целесообразно и возможно показать не более трех. В таких случаях на сводной карте изменение определенных характеристик по площади показывается для 2—3 типов минеральной воды, основными критериями для выбора которых являются практическая ценность и распространенность типа минеральной воды, величина ресурсов и целесообразность добычи ее в зависимости от глубины скважин, необходимых водоподъемных средств и т. д.

Наиболее реальный (исходя из требования наглядности карты) способ изображения величины ресурсов в этом случае — циф-

рами для основных типов минеральных вод в пределах определенной таксономической единицы гидрогеологического районирования, при выборе которой учитываются масштаб карты и степень изученности ресурсов минеральных вод. Как уже было сказано, обычно это гидрогеологический район или подрайон.

При наличии нескольких водоносных комплексов (горизонтов), содержащих минеральную воду одного типа, дается суммарная величина их ресурсов, а геологическими индексами указываются участвующие комплексы. Сначала по соответствующей карте определяется величина ресурсов минеральной воды данного типа в каждом районе или подрайоне (в тысячах метров кубических в сутки) для отдельных комплексов (горизонтов)

$$Q = F_1M_1 + F_2M_2 + \ldots + F_nM_n,$$

где $M_1, \ldots, M_n$ — модули ресурсов минеральных вод с площадями соответственно $F_1, \ldots, F_n$.

Общая величина ресурсов минеральных вод каждого типа во всех комплексах определяется суммированием полученных значений. При существенной разнице в концентрациях активных компонентов следует откорректировать эти значения (ресурсы) с учетом разбавления до одинаковой величины.

Минеральные воды некоторых типов могут представлять собой несколько локальных скоплений в пределах выделенного района (подрайона). В таком случае величина ресурсов указывается для каждого из них. Если на карте показывается 2 или 3 типа минеральных вод, количественная характеристика дается для каждого из них.

В складчатых областях при оценке ресурсов углекислых вод и азотных терм суммируются ресурсы всех наложенных впадин, расположенных в пределах района (подрайона). Прогнозные оценки, как указывалось выше, позволяют определить суммарно прогнозные ресурсы и эксплуатационные запасы, которые целесообразно тем или иным способом показать на карте. Это можно сделать при изображении использования минеральных вод специальными знаками. На карте раздельно показывается современное использование их различными водозаборными сооружениями, курортами, бальнеологическими лечебницами, заводами розлива. Знаками отображаются величины отбора минеральных вод. Кроме того, на карту наносятся все разведанные, но неосвоенные месторождения с утвержденными запасами.

Важнейшим элементом картографирования является гидрогеологическое районирование. То же самое можно сказать о тектонических нарушениях, границах водоносных горизонтов.

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД И ИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Результаты региональной оценки эксплуатационных запасов термальных вод отображаются на картах эксплуатационных запасов и перспектив использования термальных вод. Масштабы ука-

занных карт в зависимости от размеров оцениваемых гидрогеологических регионов, их сложности и степени изученности изменяются от 1 : 200 000 до 1 : 2 500 000. Для пластовых водонапорных систем карты запасов составляются по каждому из перспективных водоносных комплексов.

На карте перспектив использования термальных вод отражен комплекс природных и экономических показателей, определяющих степень перспективности выделенных в результате оценки запасов площадей, месторождений и участков термальных вод для промышленного освоения с разделением по рекомендуемой методике освоения.

Основанием для подсчета запасов и построения перечисленных выше карт должны служить следующие материалы:

— каталог фактического материала по глубоким скважинам и поверхностным термоводопроявлениям;

— карта фактического материала;

— погоризонтные карты фильтрационных параметров и динамики подземных вод;

— карты эффективных мощностей;

— погоризонтные гидрохимические и геотемпературные карты;

— структурные карты;

— таблицы геотермических показателей;

— таблицы экономических показателей геологоразведочных работ и работ по промышленному освоению месторождений термальных вод;

— гидрогеотермические разрезы.

В регионах с развитием пластовых водонапорных систем для каждого гидрогеологического района и области целесообразно составлять обобщенные погоризонтные гидрогеотермические карты, которые послужат основой для сводной карты эксплуатационных запасов и ресурсов термальных вод. В водонапорных системах трещинно-жильного типа погоризонтные карты (гидрогеотермические и запасов) не составляются. Строится обобщенная карта запасов термальных вод или карта перспектив использования термальных вод.

Гидрогеотермическая карта составляется по поверхности перспективных на термальные воды водоносных комплексов. На гидрогеотермические карты и разрезы к ним наносятся показатели, характеризующие особенности термальных водоносных комплексов. Такие карты строятся на геолого-структурной основе с показом основных гидрогеологических районов, площади развития водоносного комплекса и разломной тектоники. Изолиниями изображаются глубины залегания кровли водоносного комплекса в абсолютных отметках, цветом показываются температуры на кровле и температурные зоны в следующих диапазонах (в °С): 0—20, 20—50, 50—75, 75—100, 100—150, 150—250 и выше 250; также отображаются пространственные изменения химического состава термальных вод.

В случаях, когда изучаемый водоносный комплекс характеризуется значительной мощностью и изменением химического состава по вертикали, определяются средние по разрезу показатели минерализации. На карте в зависимости от гидрогеологических условий изучаемой территории градации минерализации могут быть различными (в г/л): до 1,1—3, 3—10, 10—35, 35—50, 50—100, 100—200, 200—300 и >300.

Термальные воды в ряде случаев являются комплексным полезным ископаемым и могут содержать промышленные концентрации I, Br, B и др, а также газы специфического состава CO_2, H_2S, N_2, NH_4 и др. Эти компоненты имеют бальнеологическое значение и на рассматриваемых картах отображаются определенными знаками. Кроме того, на гидрогеотермические карты наносятся опорные водопункты, дающие информацию о глубине залегания и температуре опробуемого интервала водоносного комплекса, его минерализации, анионном и газовом составе, содержании микроэлементов. На этих же картах показываются динамика и фильтрационные параметры изучаемого водоносного комплекса в виде изолиний напора и водопроводимости.

Гидрогеотермические разрезы. При выборе направления гидрогеотермических разрезов учитывается необходимость выявления основных закономерностей распространения, залегания, условий питания и разгрузки термальных подземных вод различных комплексов, характера гидрогеохимической и геотермической зональности. На разрезах даются те же параметры, что и на гидрогеотермических картах, а также показываются породы, слагающие разрез. Горизонтальный масштаб разрезов равен масштабу карты; вертикальный 1 : 10 и 1 : 20 по отношению к горизонтальному.

Карта потенциальных эксплуатационных запасов термальных вод строится также, как и гидрогеотермическая, на геологоструктурной основе. Только на ней целесообразно показывать глубины залегания подошвы водоносного комплекса и температуры, характеризующие возможные предельные значения этих параметров для данного комплекса.

На карте приводится количественная характеристика теплоэнергетических ресурсов как в относительном модульном, так и в абсолютном исчислении, применительно к двум методам разработки водоносных горизонтов (без поддержания и с поддержанием пластовых давлений) и двум способам эксплуатации скважин (фонтанному и насосному). Дается оценка возможных масштабов использования ресурсов на первом этапе их освоения, для чего на карту наносятся одиночные водозаборы и указывается их производительность. Количественная характеристика запасов водоносного комплекса (в виде модулей абсолютных величин и производительностей одиночных водозаборов) привязывается к определенным гидрогеотермическим зонам.

На картах запасов показывается также коэффициент сравнительной экономической эффективности промышленного освоения

запасов термальных вод, представляющий собой отношение замыкающих затрат (лимитных цен) на тепло, получаемое за счет традиционных топливно-энергетических ресурсов, к прямым приведенным затратам на единицу тепла, получаемого за счет термальных вод. Кроме того, на карте запасов термальных вод показываются месторождения и участки термальных вод разведанные, разведуемые и перспективные для постановки поисково-разведочных работ на термальные воды с указанием видов использования (теплоснабжение, бальнеология, извлечение промышленных компонентов и др.).

Карта перспектив использования термальных вод является результирующей и строится на основе выше рассмотренных карт и карты гидрогеологического районирования изучаемой территории с целью определения перспектив и планирования дальнейших поисково-разведочных работ на термальные воды в масштабе как страны, так и отдельных ее регионов. На этой карте показываются районы развития термальных вод пластового типа и районы развития термальных вод трещинно-жильного типа. В пределах указанных районов выделяются подрайоны перспективные, с ограниченными перспективами и бесперспективные на термальные воды и парогидротермы с указанием возможного вида их применения (теплоснабжение, технические цели, бальнеология и др.).

В перспективных подрайонах развития термальных вод пластового типа показываются основные термальные водоносные комплексы и приводятся ресурсы по каждому из них в отдельности в абсолютных величинах применительно к двум методам разработки водоносных комплексов (без поддержания и с поддержанием пластовых давлений) и двум способам эксплуатации скважин (фонтанному и насосному), а также с указанием коэффициента экономической эффективности. В перспективных подрайонах и подрайонах с ограниченными перспективами развития термальных вод и парогидротерм трещинно-жильного типа прогнозные ресурсы даются как в целом для всего подрайона, так и по отдельным его месторождениям. Кроме того, на карте перспектив использования термальных вод показываются месторождения термальных вод и парогидротерм (разведанные, разведуемые и перспективные) с указанием запасов, минерализации и температуры воды, а также вида их возможного применения. Графические материалы по результатам разведочных работ на конкретных месторождениях термальных вод или их участках должны отображать геологическое строение, гидрогеологические, геотермические условия месторождения и района, результаты разведки и подсчета запасов.

По разведанному месторождению графические материалы должны содержать: обзорные карты масштабов 1 : 500 000 — 1 : 1 000 000 с населенными пунктами, на которых показывается местоположение разведанного месторождения; геологическую и гидрогеологическую карты масштабов 1 : 25 000—1 : 200 000 (в зависимости от типа и размеров месторождения) со стратиграфической колонкой, геологическими и гидрогеологическими разрезами;

другие специальные карты (схемы), используемые для обоснования запасов: фактического материала, структурную, мощностей (эффективных мощностей) оцениваемых или питающих водоносных горизонтов и разделяющих их слабопроницаемых слоев, приведенных уровней, гидрохимическую, изотерм, водопроводимости и др.

По детально разведанной площади перечисленные карты составляются, как правило, в масштабах 1 : 5 000—1 : 100 000, а для крупных месторождений или участков, занимающих большие площади, в масштабе 1 : 25 000, реже 1 : 50 000. Во всех случаях представляется план подсчета запасов, где должен быть показан общий контур оцениваемой площади, приведена схема проектного водозабора, применительно к которой подсчитаны запасы (по категориям) по отдельным скважинам. В перспективных подрайонах развития термальных вод и парогидротерм трещинно-жильного типа прогнозные ресурсы даются как в целом для всего подрайона, так и по отдельным его месторождениям.

Глава 9

МЕТОДИКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Разведка месторождений глубоких подземных вод сопряжена со значительными затратами денежных, материальных и трудовых ресурсов. Объясняется это в основном объективными причинами, к числу которых относятся: большая глубина залегания продуктивных водоносных комплексов, необходимость применения тяжелого и сложного оборудования и приборов, высокие требования к степени изученности месторождений для передачи их в промышленное освоение и др. Вместе с тем, отсутствие, например, специального гидрогеологического оборудования и технических средств является субъективной причиной не только высокой стоимости, но и в ряде случаев низкой эффективности исследований или их значительной продолжительности.

Гидрогеологические работы при поисках и разведке месторождений глубоких подземных вод включают комплекс различных методов исследований. Методы исследований для гидрогеологических целей могут применяться в различных модификациях и сочетаниях.

Виды и объемы гидрогеологических работ и исследований зависят от типа и сложности строения месторождения и стадийности изысканий. На начальных стадиях изысканий применяются в основном косвенные методы, направленные на выявление месторождений, определение их масштабов и принципиальных особенностей геолого-гидрогеологического строения. К таким методам относятся гидрогеологические съемки, специальные съемки (термомет-

рические, гидрогазохимические, инфракрасные), площадные геофизические исследования и т. д. На стадиях предварительной и детальной разведки используются в основном прямые методы (бурение и гидрогеологическое опробование глубоких скважин) в некоторых случаях в сочетании с площадными геофизическими исследованиями. Гидрогеологические исследования на действующих водозаборах имеют свою специфику.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Наиболее разнообразный комплекс исследований для гидрогеологических целей выполняется на месторождениях минеральных и теплоэнергетических вод в горноскладчатых областях. На таких месторождениях обычно проводятся следующие виды работ и исследований: крупномасштабные геолого-гидрогеологические, газогидрохимические, эманационные, инфракрасные съемки, площадные геофизические работы (электро-, грави-, магниторазведка и др.), режимные наблюдения за естественными выходами минеральных и термальных вод, бурение и опробование картировочных, поисковых и разведочных скважин. Работы и исследования, предшествующие бурению и опробованию скважин, составляют значительный удельный вес по объемам и затратам.

Гидрогеологические исследования в горноскладчатых районах имеют многоцелевое назначение: выявляются особенности тектоники района с определением характера раскрытости нарушений, оценивается тепловой потенциал (тепловая мощность) месторождения, устанавливаются основные продуктивные водоносные комплексы или зоны и их положение в плане и разрезе, качество подземных вод, масштабы и группа сложности месторождения и др. На основе съемок и геофизических исследований многие задачи решаются на качественном уровне. Однако косвенные методы позволяют эффективно определять места заложения поисково-разведочных скважин, обоснованно выбирать глубину их. Опробование разведочных гидрогеологических скважин также имеет свою специфику. Скважины опробуются обычно поинтервально сверху — вниз, так как положение обводненных зон в разрезе даже предположительно неизвестно. При выявлении обводненных зон хорошие результаты дают термометрия (с помощью термокос), глубинное поинтервальное опробование, расходометрия, изотопные исследования воды и газа и др.

Имеет свои особенности комплекс гидрогеологических исследований на месторождениях минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод в межгорных и предгорных впадинах, выполненных мощными осадочными отложениями. На месторождениях этого типа роль косвенных методов снижается. Из косвенных методов наиболее широко используются различные площадные геофизические исследования (электроразведка, сейсморазведка и др.),

режимные наблюдения в случае наличия разгрузки глубоких подземных вод.

Задачей геофизических работ является выявление тектонических нарушений и установление структурного плана (в частности под акваториями), определение необходимых проектных глубин скважин и мест их бурения в соответствии со структурным планом месторождений. Центр тяжести исследований переносится на традиционные гидрогеологические методы — бурение и опробование глубоких скважин. Опробование проводится под защитой колонны по способу снизу — вверх с установкой между интервалами разделительных цементных мостов. Большую роль играют каротажные геофизические исследования, позволяющие решать большинство геологических и гидрогеологических вопросов: расчленение разреза на водоносные комплексы и водоупоры, определение суммарных и эффективных мощностей, предварительная оценка водно-физических свойств вмещающих пород и минерализации, геотермического градиента и др. Основным же средством изучения водоносных комплексов служат опытные откачки, при которых получают необходимые исходные данные для определения гидрогеологических параметров и установления качества воды.

На месторождениях глубоких подземных вод в артезианских бассейнах древних платформ и эпипалеозойских плит гидрогеологические исследования включают обычно бурение и опробование глубоких разведочных скважин с комплексом сопутствующих исследований. Площадные геофизические исследования проводятся в очень редких случаях — при изучении карбонатных водоносных комплексов.

В процессе бурения скважин выполняется обширный комплекс геофизических исследований и опробование вскрытых интервалов пластоиспытателями на трубах. Опробование водоносных комплексов или горизонтов осуществляется под защитой эксплуатационной колонны по способу снизу — вверх с последовательным вскрытием горизонтов перфорацией и последующим проведением пробных, опытных или опытно-эксплуатационных откачек. В связи с постепенным внедрением способа эксплуатации месторождений промышленных и теплоэнергетических вод с поддержанием пластовых давлений водоносные горизонты опробуются также опытными нагнетаниями.

Перечисленные виды полевых изысканий выполняются непосредственно на месторождениях и направлены на их геолого-гидрогеологическое изучение. Геологоразведочные работы сопровождаются лабораторными исследованиями. Они включают изучение водно-физических свойств водовмещающих пород (на образцах керна), химического и газового состава подземных вод, физических свойств, теплосодержания, технологических свойств. Специальные виды исследований проводятся для минеральных вод. В ряде случаев выполняется комплекс исследований для изучения агрессивности, солеотложений и некоторых других вопросов.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Комплекс поисково-разведочных работ на подземные воды в каждом случае определяется не только сложностью гидрогеологических условий территории, но и степенью ее изученности, которая оценивается с помощью анализа материалов всех предшествующих геологических, гидрогеологических и геофизических исследований.

Основными видами работ при изучении месторождений глубоких подземных вод являются геолого-гидрогеологическая и специализированная гидрогеологическая съемки, буровые, опытно-фильтрационные, геофизические, гидрологические исследования, наблюдения за естественным и нарушенным режимом подземных вод, обследование действующих водозаборных сооружений, отбор проб и химические исследования воды, специальные виды исследований (гидрогеохимические, геотермические, изотопные и др.).

Съемочные работы

Геолого-гидрогеологическая съемка выполняется преимущественно на поисковой стадии с целью выявления месторождений минеральных и термальных вод в масштабах 1 : 10 000—1 : 50 000, реже более крупных или мелких. Общей задачей съемки являются изучение геологического строения и гидрогеологических условий территории, выявление перспективных площадей и водоносных горизонтов, содержащих минеральные и термальные воды. Кроме того, в процессе съемки устанавливаются основные факторы, определяющие условия питания и формирования минеральных и термальных вод, выявляются генетическая природа формирования проницаемости горных пород и основные закономерности изменения фильтрационных свойств. Обычно поисково-съемочные работы продолжительны и дорогостоящи, поэтому очень важно выбрать и правильно сочетать различные виды работ. При этом обязателен учет экономической целесообразности проведения того или иного вида работ в зависимости от поставленных задач, и в первую очередь — от потребности в минеральной или термальной воде районов поисков.

Для повышения эффективности геологоразведочных работ необходимо более оперативно решать вопросы научно-методического перевооружения производственных геологоразведочных служб, прежде всего путем частичного сокращения или полного исключения из поисковых работ устаревших методик и замены их вновь разрабатываемыми, более широко используемыми методами исследований, позволяющих расшифровать структурные, гидрогеологические и геотемпературные особенности конкретных регионов. К таким видам работ относятся различные аэрометоды (аэрофотосъемка, ИК-съемка, аэромагнитная съемка), наземные геофизические исследования, гидрогеохимическая, газовая, термометриче-

ская, эманационная съемка. При проектировании комплекса поисковых работ следует отдавать предпочтение современным наиболее информативным и менее трудоемким методам, опираясь на такие поисковые признаки, которые отвечают требованиям контрастности, высокой производительности и экономичности, технической оснащенности, дистанционности. Таким требованиям прежде всего отвечают тепловые аномалии, формирующиеся в приповерхностных частях разреза при длительной восходящей разгрузке термальных и минеральных вод по системам глубокоуходящих трещинных каналов. Для минеральных вод некоторых типов таким поисковым признаком являются газы (CO_2, H_2S), выделяющиеся в зонах их близповерхностной разгрузки.

Для планирования исследований прогноза на минеральные и термальные воды, особенно в горноскладчатых районах, весьма перспективен анализ материалов аэрокосмических съемок. Такой анализ проводится методом ступенчатой генерализации, предложенный Г. С. Вартаняном. Заключается он в комплексном дешифрировании разномасштабных фотоснимков земной поверхности — от аэроснимков до космических. Результаты дешифрирования переносятся на геологическую карту, где показываются основные естественные источники подземных вод. Анализ полученных данных позволяет выявить зоны тектонических дислокаций, а также наметить некоторые перспективные на минеральные и термальные воды участки, представляющие собой зоны пересечения разнонаправленных систем нарушений.

Поисково-съемочным наземным работам должно предшествовать тщательное изучение имеющихся гидрогеологических материалов, на основании которого следует уточнить прямые и косвенные показатели наличия минеральных и термальных вод, наиболее вероятные для данного района: участки развития травертинов и гейзеритов, обилие участков окремнения, кварцевых, кальцитовых, флюоритовых жил, охристые налеты; наличие газовых грифонов в руслах рек и других водоемов, незамерзающие участки рек, парогазовые струи, прогретые площадки и зоны измененных пород, повышенная минерализация и температура вод родников иногда характерные названия источников, урочищ и др. В ряде случаев съемка может сопровождаться бурением поисковых скважин.

Буровые работы

Буровые работы обеспечивают основной объем информации о месторождении и включают бурение поисковых, разведочных, разведочно-эксплуатационных, наблюдательных и при необходимости нагнетательных скважин.

Поисковые скважины бурятся на стадии поисков для изучения геологического разреза, выделения и опробования всех водоносных горизонтов с целью выявления перспективных источников

минерального и теплоэнергетического сырья, а также лечебных минеральных вод. Учитывая большие глубины залегания термальных, минеральных и промышленных вод, поисковые скважины бурятся в том случае, когда полностью отсутствуют данные для решения задач поисковой стадии.

Разведочные скважины бурятся с целью изучения литологического состава, мощности, условий залегания, водообильности перспективных водоносных горизонтов, определения их коллекторских и фильтрационных свойств, установления качества и граничных условий подземных вод. Бурение таких скважин производится на стадиях предварительной (на наиболее сложных месторождениях) и детальной разведок.

Разведочно-эксплуатационные скважины бурятся обычно на стадии детальной разведки. При этом учитывается проектная схема водозабора. Бурение их согласовывается с заинтересованными организациями. По конструкции и оборудованию они должны отвечать условиям эксплуатации. На многих месторождениях минеральных, а иногда и термальных вод разведочно-эксплуатационные скважины могут буриться уже на стадии предварительной разведки. По окончании бурения они передаются эксплуатирующей организации.

Наблюдательные скважины оборудуются с целью изучения естественного и нарушенного режима подземных вод, а при проведении опытно-фильтрационных работ — для установления развития депрессионной воронки и определения гидрогеологических параметров. Выявляется также степень подвижности контуров подземных вод с различным качеством. С целью изучения глубоких горизонтов число наблюдательных скважин в связи с большими материальными затратами ограничено, или такие скважины вовсе отсутствуют.

Буровые работы требуют, как правило, больших затрат. Поэтому обращается самое серьезное внимание на проектирование бурения, т. е. на вопросы размещения скважин, выбор их оптимальных конструкций, способ бурения, технологию вскрытия продуктивных водоносных горизонтов и опробование скважин. Решение этих вопросов в каждом конкретном случае зависит от целевого назначения скважин, геологоструктурной обстановки и геологотехнических условий проходки скважин.

Схема размещения, число разведочных скважин и расстояние между ними определяются прежде всего типом месторождения и его основными геологоструктурными особенностями. Проведение площадной разведки имеет смысл либо при изучении пластовых месторождений широкого регионального распространения, либо при изучении месторождений со сложной структурой, и особенно при наличии большого количества различно ориентированных разрывных нарушений, роль которых требуется выяснить. Наиболее тщательный подход к размещению скважин необходим при разведке месторождений в складчатых областях, где особое значение

приобретает тектонический анализ. При выборе оптимальных схем размещения скважин на исследуемой площади и определения необходимого их числа следует исходить из следующих обязательных требований: 1) тщательного анализа геолого-гидрогеологических условий по данным всех предыдущих исследований; 2) использования опыта изучения месторождений, имеющих аналогичные геолого-тектонические и гидрогеологические условия; 3) последовательного сгущения сети скважин по мере получения данных бурения, первоначально проводимого по разреженной сетке; 4) учета предполагаемой гидродинамической расчетной схемы и схемы водозабора.

При гидрогеологических исследованиях сейчас успешно используются методы математического моделирования, которые на крупных месторождениях целесообразно применять уже на стадии предварительной разведки, основываясь на принципе последовательных приближений. В зависимости от степени сложности месторождения можно решить 1—2 задачи, что позволяет корректировать работы, в частности выбрать наиболее рациональное размещение на площади разведочных выработок.

Глубина скважин должна обеспечивать полное вскрытие перспективного водоносного горизонта (зоны), диаметр и устьевое оборудование их — возможность установки насосов для опробования горизонтов, наблюдений за уровнем, для самоизливающихся скважин — за давлением, проведения геофизических и различных глубинных исследований. При определении глубин и диаметров скважин, а также размещении их в период разведки месторождений особенно важно учитывать возможность использования одной и той же скважины для различных целей, например, в качестве разведочно-эксплуатационных и разведочных, разведочных и наблюдательных и т. д. При выборе конструкции разведочно-эксплуатационных скважин учитываются возможность их последующей эксплуатации с проектной производительностью, а также агрессивные и коррозионные свойства воды.

Иногда бывает целесообразно бурить наклонные скважины, в частности при определенных соотношениях геолого-структурных и орографических условий. Например, наклонные скважины проходятся при необходимости прослеживания на глубине той или иной закрытой с поверхности и уходящей под коренной берег речной долины крутопадающей тектонической зоны (трещины или трещиноватого жильного тела), которая является путем движения подземных вод.

Способ, технология бурения и конструкция фильтров должны обеспечить получение объективных характеристик водоносных горизонтов как по их водообильности и фильтрационным свойствам, так и качеству воды. Поэтому необходимы правильный подбор промывочных жидкостей, учитывающий предполагаемый химический состав подземных вод, бурение чистой водой при устойчивых коллекторах и невысоких напорах подземных вод, разглинизация скважин при применении глинистых растворов.

Гидрогеологические исследования скважин

Гидрогеологические исследования скважин включают наблюдения и поинтервальное опробование в процессе бурения, опытно-фильтрационные работы и глубинное опробование скважин.

Наблюдения в процессе проходки скважин без специальных установок бурения для гидрогеологических опробований производятся с целью выявления или уточнения положения в геологическом разрезе, вскрываемом скважиной, горизонтов (зон) термальной, минеральной и промышленной воды. При этом о водоносности пород судят по косвенным показателям: составу проходимых пород, изменению объема и физических свойств промывочной жидкости и ее химического состава (фильтрата).

Данные о характере разреза получают (помимо исследования керна) по результатам наблюдений за скоростью бурения, характером работы бурильного агрегата, и изучению шлама. Наблюдение за балансом глинистого раствора позволяет судить о вскрытии водоносного горизонта и его водопроницаемости. О притоке воды в скважину свидетельствует изменение минерализации и состава промывочной жидкости (фильтрата). При этом увеличение минерализации может произойти не только из-за притока сильноминерализованных вод из вскрываемых водоносных горизонтов, но и вследствие выщелачивания промывочной жидкостью солей из пород. Поэтому при гидрогеологической интерпретации данных об изменении химических свойств фильтрата глинистого раствора нужно учитывать результаты всех других наблюдений (режим бурения, баланс глинистого раствора, состав шлама).

Поинтервальное опробование скважин откачками (выпусками) в процессе проходки проводится с целью установления интервала, содержащего минеральные, термальные или промышленные воды, а также получения сведений о всех других водоносных горизонтах. На месторождениях, где ожидаются высокие избыточные напоры, следует предусматривать оборудование устья скважин противовыбросовой арматурой — превенторами. После достижения скважиной заданной глубины производится замена технической (промывочной) жидкости на пластовую воду с помощью желонирования, свабирования, иногда свободного выпуска. Затем приступают к откачке (выпуску).

Продолжительность поинтервальных откачек от 2—3 до 8—16 ч. В процессе таких откачек ведутся наблюдения за дебитом, уровнем подземных вод, содержанием некоторых компонентов, характерных для данного типа воды и легко определяемых. В ряде случаев откачку целесообразно сопровождать расходометрическими исследованиями с целью выявления наиболее проницаемых зон вскрытого разреза, а после завершения откачки отбирать из исследуемого интервала глубинную пробу воды и газа.

При опробовании вод высокой газонасыщенности желательно, чтобы глубинная проба отбиралась после того, как уровень воды в скважине восстановился до статического, поскольку при этом

будут достигнуты гидродинамические условия, наиболее близкие к условиям в пласте.

Поинтервальное опробование может производиться как с обсадкой ствола скважины (с надежной изоляцией ранее опробованных интервалов), так и без обсадки путем наращивания опробуемого интервала, применения пластоиспытателей, а также изоляции опробуемых интервалов с помощью системы пакеров, если водоносные горизонты разобщены водоупорными слоями. В зависимости от типа месторождения, стадии его изучения, а также глубины и категории скважин шаг таких поинтервальных опробований может быть различным и должен обеспечивать уверенную интерполяцию в пределах разреза. Для месторождений, приуроченных к пластовым системам, поинтервальное опробование чаще всего не имеет смысла. Оно не исключается в тех случаях, когда разрез сложен породами, литологически мало отличающимися друг от друга, а гидрогеологическую роль каждого из пластов оценить по косвенным показателям не удается.

В процессе проходки скважин и при поинтервальных откачках серьезное внимание должно уделяться замеру уровней (напоров) воды в скважинах. При этом следует добиваться того, чтобы точные данные по напорам были получены для различных глубин, что необходимо с целью выявления гидродинамической структуры месторождения.

Опытно-фильтрационные работы — основной вид исследований при поисках и разведке подземных вод. Задача их заключается в определении основных гидрогеологических параметров, граничных условий горизонтов, возможной производительности скважин. Для многих типов месторождений минеральных термальных вод эта задача сводится к получению данных для оценки запасов гидравлическим методом.

Методика опытно-фильтрационных работ определяется их целевым назначением, стадией исследований и гидрогеологическими условиями конкретного месторождения. По способу производства такие работы подразделяются на выпуски (для самоизливающих скважин) и откачки, когда применяются водоподъемные средства. По целевому назначению откачки (выпуски) могут быть пробными, опытными и опытно-эксплуатационными. Для всех видов откачек (выпусков) общими являются следующие требования: 1) устья самоизливающих скважин оборудуются специальной фонтанной арматурой, применяемой на нефтяных скважинах, которая позволяет регулировать дебит скважины, замерять дебит и устьевые давления, проводить глубинные исследования; 2) при проведении принудительных откачек должна быть обеспечена возможность замера уровня в скважинах, лучше всего — путем спуска в них пьезометрических трубок; 3) в качестве водоподъемных средств для минеральных вод в большинстве случаев недопустимо использование эрлифта, так как это приведет к нарушению газогидрохимического равновесия; 4) при исследовании газирующих минеральных вод скважины необходимо оборудовать газоотделителями, по-

зволяющими одновременно с дебитом воды определять дебит газа.

Обязательным условием для получения достоверных значений гидрогеологических параметров является соблюдение режима откачки (выпуска), обеспечивающего применение существующих методов их расчета, что обеспечивается проведением откачек при постоянном дебите скважины. При невозможности обеспечения постоянного дебита опыты проводятся при постоянном понижении.

При всех видах откачек (выпусков) на каждом из понижений, если их несколько, замеряются дебит воды и газа, уровень воды (или давления), температура воды, при необходимости атмосферное давление, температура воздуха; отбираются пробы воды и газа на химический анализ. При выборе измерительной техники с целью проведения опытно-фильтрационных работ следует стремиться к использованию наиболее надежных и высокочувствительных приборов, желательно с постоянной записью. Например, для измерения устьевых давлений требуются образцовые манометры, точность и чувствительность которых в 2—3 раза превышает минимальную величину изменения этого показателя. Особые трудности возникают при опробовании самоизливающих скважин, так как устьевые замеры не интерпретируются. В настоящее время они достаточно широко используются в основном при разведке месторождений подземных промышленных вод. Однако возможности их широкого применения для всех трех типов глубоких подземных вод ограничены, так как выпускаемые серийно глубинные манометры весьма несовершенны и имеют ряд недостатков. Низкая чувствительность применяемых приборов была одной из причин, приведших к ложным выводам о стабилизации гидродинамического режима откачки, существенным погрешностям в оценке эксплуатационных запасов минеральных вод.

Работа исследователей Гидрогеологического управления «Геоминвод» в настоящее время направлена на разработку способов опробования и эксплуатации газирующих высокотермальных минеральных вод. В некоторых случаях единственным способом получения надежных параметров является бурение наблюдательных скважин.

Частота всех видов наблюдений в процессе опытно-фильтрационных работ определяется их целевым назначением, общей продолжительностью откачки и задачей самих наблюдений. Она должна достаточно равномерно характеризовать весь период откачки и выявлять возможные изменения гидродинамических и гидрохимических показателей. Пробные откачки (выпуски) проводятся преимущественно на стадии поисковых работ для предварительной оценки фильтрационных свойств и качества воды отдельных водоносных горизонтов и трещинных зон, а также различных участков распространения изучаемых вод с целью выбора наиболее перспективных для постановки разведочных работ. При планировании опытных работ на стадиях предварительной и детальной разведок пробные откачки (выпуски) проводятся для определения возможной производительности скважин. Опытные откачки проводятся на

стадии предварительной и детальной разведок и подразделяются на одиночные, кустовые и групповые.

Задача опытных откачек — определение расчетных гидрогеологических параметров и выявление закономерностей их изменения в пространстве; установление зависимости между дебитом скважин и понижением уровня воды, а также величин срезок уровней при оценке запасов гидравлическим методом; изучение химического и газового состава минеральных вод, температуры, их изменения в зависимости от водоотбора; изучение агрессивных свойств минеральных вод и процессов солеотложения. Режим и продолжительность их, число понижений определяются целевым назначением, стадией разведки, характером водоносного горизонта и сложностью гидрогеологических условий месторождения.

При разведке месторождений минеральных, термальных и промышленных вод преобладают опытные одиночные откачки, которые обычно проводятся при 1—2 понижениях уровня. Задачей их является установление зависимости между дебитом скважины и понижением уровня, а также степенью устойчивости химического состава воды и интенсивностью водоотбора, при неравномерно-трещиноватых коллекторах часть откачек осуществляется при трех ступенях. Обязательным условием при этом является различие дебитов на различных ступенях не менее чем в 1,5—2 раза.

Длительность опытных откачек определяется по данным о горизонтах, полученным с помощью пробных откачек. Однако на основании существующего опыта можно сказать, что она должна быть не менее 1—3 суток на каждой ступени. В процессе работ длительность может корректироваться в зависимости от характера изменения гидродинамических и физико-химических показателей. При этом учитывается, что во многих случаях полная стабилизация гидродинамического режима недостижима. Прежде всего это касается пластовых месторождений платформенных областей, для которых характерно также постоянство химического состава и минерализации воды в пределах горизонта на большой площади. Длительность опытных откачек в данном случае минимальная. Более длительные откачки с несколькими ступенями проводятся при наличии данных о зависимости качества воды от дебита. Поэтому в процессе опытной откачки должна быть выявлена связь качества воды с интенсивностью водоотбора и учтена при проектировании опытно-эксплуатационного выпуска. Кроме того, по результатам опытной откачки должен быть определен оптимальный эксплуатационный дебит скважин и при этом учтены их пескование, пульсирующий режим и явления термогазлифта, солеотложения и др.

Опытные кустовые откачки проводятся с целью определения гидрогеологических параметров, степени подвижности гидрохимических и геотермических границ, установления срезок уровня при оценке запасов гидравлическим методом.

Методика опытных кустовых откачек определяется в зависимости от основной задачи и гидрогеологических особенностей мес-

торождения. Исходя из задачи определения гидрогеологических параметров, наблюдательные скважины должны располагаться в зоне квазистационарного режима, а величина понижения уровня на конец откачки в дальней наблюдательной скважине значительно превысить точность замера уровня. Число наблюдательных скважин устанавливается в соответствии с глубиной залегания водоносного горизонта. На месторождениях глубоких подземных вод бурится минимальное число таких скважин. В то же время максимально используются все пробуренные ранее скважины различного назначения. Это необходимо учитывать при завершении исследований скважин на любой стадии поисково-разведочных работ, предусматривая их консервацию до следующей стадии, а не ликвидацию.

Определяя расстояния между наблюдательными и опытными скважинами, а также продолжительность откачки, необходимо стремиться к оптимальному варианту, когда с помощью кустовой откачки будет решено максимальное число задач, но при этом продолжительность откачки не должна превышать 20—30 суток. В некоторых случаях для создания необходимой степени возмущения пласта, установления эксплуатационных возможностей месторождения (участка) опытные откачки проводят из группы скважин по возможности с суммарной производительностью, близкой к проектной.

Для многих месторождений минеральных термальных вод первостепенной задачей кустовых откачек является изучение подвижности гидрохимических и геотермических границ и характера взаимодействия скважин, поэтому число наблюдательных скважин и система их расположения в первую очередь определяются геолого-тектоническими и гидродинамическими условиями месторождения. Однако во всех случаях следует также предусматривать возможность и необходимость определения по данным кустовой откачки гидрогеологических параметров. Эффективность кустовых откачек в значительной степени зависит от полноты и качества проводимых наблюдений, виды и методика которых общеизвестны. На месторождениях минеральных вод гидроинжекционного типа или распространенных узколокально при кустовых откачках целесообразно проводить глубинное опробование скважин.

Ценным источником информации о структуре фильтрационного поля являются данные прослеживания восстановления уровня, хотя до настоящего времени они не всегда используются и очень часто недостаточно представительны по качеству. Прежде всего это касается изучения месторождений минеральных вод. Объективной причиной их низкого качества является отсутствие измерительной техники необходимой точности и чувствительности для самоизливающих скважин. Субъективная причина — недостаточное внимание к гидродинамической структуре месторождения при оценке запасов гидравлическим методом.

Опытно-эксплуатационные откачки (выпуски) проводятся на стадии детальной разведки подавляющего большинства месторож-

дений минеральных вод, а также на месторождениях термальных и промышленных вод при весьма сложных гидрогеологических условиях. Основная задача их заключается в выявлении закономерностей изменения уровня (реже дебита) и качества минеральных вод, чаще всего при заданной величине водоотбора. Полученные эмпирические закономерности для большинства месторождений минеральных, некоторых термальных и промышленных вод используются с целью оценки эксплуатационных запасов гидравлическим или комбинированным (гидравлическим в сочетании с гидродинамическим) методами.

При разведке промышленных и термальных вод, а иногда и минеральных, приуроченных к многопластовым водонапорным системам, возникает необходимость оценки возможностей совместной эксплуатации нескольких водоносных пластов с различными фильтрационными свойствами, напорами и качеством воды. Это связано с тем, что при работе скважины, вскрывающей несколько таких горизонтов, происходит переток по стволу скважины довольно длительное время, хотя перераспределение напоров в ней практически мгновенное. Специальными исследованиями (например, на месторождениях Западной Туркмении) установлено, что прогнозирование понижений возможно с помощью существующих решений, не учитывающих перетока по стволу скважины: в то же время при прогнозировании качества воды игнорирование перетока может привести к существенным погрешностям.

В настоящее время существуют аналитические решения такого прогноза в основном для двухслойной системы, пока не применяющиеся на практике. Поэтому на данном этапе наиболее целесообразный, а для многослойной системы единственно возможный путь решения вопроса о совместной эксплуатации таких горизонтов — это опытно-эксплуатационная откачка (выпуск) при условиях, близких к эксплуатационным.

Методика опытно-эксплуатационной откачки обосновывается с помощью анализа результатов всех проведенных на предыдущих стадиях работ. Несколько режимов водоотбора имеют смысл в том случае, когда существуют предпосылки или данные: 1) об ограниченности естественных ресурсов подземных вод горизонта и, соответственно, возможности их оценки по результатам такой откачки; 2) о зависимости качества от интенсивности водоотбора. При этом следует учитывать реальную возможность установления опытным путем закономерностей изменения качества подземных вод. Это целесообразно если: 1) имеется опасность подтягивания некондиционных вод в вертикальном разрезе; 2) водозаборные скважины расположены поблизости от контура распространения некондиционных вод; 3) возможно оценить подвижность контуров кондиционных вод в зависимости от водоотбора по наблюдательным скважинам (обычно на гидроинжекционных месторождениях III группы). Как правило, такие условия характерны для сложных месторождений минеральных, реже термальных вод в складчатых областях, при разведке которых опытно-эксплуатационные откачки

(выпуски) проводятся при 2—3-х ступенях водоотбора. Одна из ступеней соответствует проектному дебиту. Во всех остальных случаях достаточно одной ступени, когда дебит близок к проектному.

Продолжительность опытно-эксплуатационных откачек (выпусков) определяется их задачами и сложностью гидрогеологических и гидрохимических условий месторождения. Для выявления условий совместной эксплуатации многопластовых водоносных комплексов длительность их зависит от соотношения напоров, водопроводимости и дебита скважины, определяющих скорость перетока по их стволу, которую ориентировочно можно рассчитать по данным раздельного опробования пластов. Эмпирический показатель— усредненный химический состав воды и стабилизации его. Если основной задачей опытно-эксплуатационной откачки (выпуска) является последующая оценка по ее результатам эксплуатационных запасов гидравлическим методом, то длительность ее определяется следующими условиями: 1) эмпирическая зависимость должна отражать основные границы водоносного горизонта, выявленные на предыдущей стадии; 2) будут получены данные о влиянии водоотбора на контуры подземных вод кондиционного качества. Следует учесть, однако, что верхний предел продолжительности ограничен. Поэтому вследствие замедления со временем темпа падения уровня достоверное определение эмпирической зависимости S от t становится затруднительным, а иногда не удается зафиксировать и само дальнейшее падение уровня при разумной продолжительности опыта. На месторождениях, где режим подземных вод находится под прямым воздействием инфильтрации атмосферных осадков, следует учитывать сезонные колебания уровня и возможность определения собственно понижения его в результате откачки.

Практика показала, что целесообразная продолжительность опыта по приведенным соображениям редко превышает 1 год даже для наиболее сложных и крупных месторождений. Более продолжительные опытно-эксплуатационные откачки (выпуски) обычно обосновывались необходимостью оценки степени устойчивости качества подземных вод в процессе водоотбора, хотя вполне очевидно, что если просто увеличить длительность опыта, то решить этот вопрос почти нереально. При наличии предпосылок о возможном изменении качества подземных вод, как правило, на месторождениях гидроинжекционного типа, требуется проведение опытных работ по специальной методике, которая будет рассмотрена дальше. Для всех опытно-эксплуатационных откачек обязательно надо наблюдать за дебитом воды и газа, положением уровней (давлений), температурой, химическим составом, а также проводить специальные наблюдения за солеотложениями в скважинах и на поверхности, за коррозионной активностью воды.

Глубинное опробование скважин при изучении глубоких подземных вод — весьма перспективный метод, позволяющий получать неискаженные данные по напорам, их химическому составу на различных глубинах и ориентировочные оценки водообильности и

фильтрационных параметров отдельных пластов. Такие исследования проводятся с помощью глубинных пробоотборников, манометров, пластоиспытателей как в процессе бурения, так и после него. При гидрогеологических исследованиях используются приборы, разработанные и широко применяемые при разведке нефтяных и газовых месторождений. Поэтому большинство из них не учитывает некоторой специфики исследований глубоких подземных вод (высокой температуры, агрессивности, больших расходов и др.), что приводит к трудностям при работе с ними.

Для опробования глубоких скважин в устойчивых породах можно использовать пластоиспытатели на бурильных трубах типа КИИ ГрозНИИ, СИП-3. По окончании проходки применяются опробователи типов ОПК-4-5, ОПК-7-10, ОПТ, ОПГ. Из большого числа имеющихся глубинных пробоотборников наиболее универсальны и хорошо зарекомендовали при эксплуатации ПД-3М и ПРИЗ-2, выпускаемые серийно.

Глубинное опробование эффективно при применении его в комплексе с наземными гидрогеологическими наблюдениями и такими геофизическими исследованиями скважин, как расходометрия, резистивиметрия, термометрия.

Правильность методических позиций проведения всех видов опытно-фильтрационных работ и их интерпретации существенно зависит от своевременности и тщательности обработки полученных данных. Все результаты уже в процессе опыта нужно подвергать графической обработке: строить графики изменения во времени уровней (или понижений), дебита воды, газа, температуры, содержания характерных компонентов, что позволяет судить о степени стабилизации режима откачки, зависимости различных показателей друг от друга, сезонных и других внешних факторов. Соответственно при необходимости может быть откорректирована дальнейшая методика проведения опыта. Кроме того, строятся гидрогеологические профили и карты, на которых отражаются результаты наблюдений за развивающейся депрессией и продвижением гидрохимических контуров в плане и разрезе.

Исследования химического состава подземных вод

Исследования химического состава и физических свойств подземных, а при необходимости и поверхностных вод обязательны в процессе их поисков и разведки, поскольку химические и физические характеристики прежде всего определяют принадлежность таких вод к соответствующему типу минеральных, теплоэнергетических или промышленных. Основными задачами гидрохимических исследований являются: 1) оценка качества подземных вод с точки зрения использования их как лечебных, бальнеотерапевтических, теплоэнергетических и промышленных; 2) получение гидрохимических данных, необходимых для выявления источников и механизмов формирования подземных вод, прогноза качества их при эксплуатации, в том числе с учетом обратной закачки отрабо-

танных вод. Тем самым определяется необходимость такого распределения исследований по площади и в разрезе, которое обеспечивает надежную информацию о закономерностях изменения качества подземных вод также по площади и в разрезе. При этом помимо основного состава существенное внимание обращается на состав свободных и растворенных газов, содержание специфических компонентов.

В зависимости от конкретной задачи химические анализы воды по степени детальности (типу определяемых компонентов) и точности подразделяются на оперативные (отдельные свойства или характерные компоненты), краткие (в том числе полевые), сокращенные и полные. Содержание их достаточно общеизвестно.

Минеральные и промышленные воды исследуются кроме обычных методов еще и специальными, позволяющими решить вопрос о пригодности их для тех или иных целей. Такие исследования минеральных вод проводят различные институты курортологии, изучающие их воздействие на человеческий организм или оценивающие их пригодность по аналогии с уже известными минеральными водами того же состава. Промышленные воды подвергаются специальным технологическим исследованиям, на основании которых оцениваются возможность извлечения из них полезных компонентов и допустимые нижние пределы их содержания.

Изучение режима подземных вод

Изучить режим подземных вод исследуемого месторождения очень важно для того, чтобы установить его гидрогеологические условия, источники и пути восполнения естественных ресурсов минеральных вод, нередко особенности геологической структуры, степень взаимоотношения отдельных горизонтов и зон друг с другом и с поверхностными водами. Данные наблюдений за режимом часто используются при оценке технического состояния разведочных и эксплуатационных выработок. Непосредственной задачей наблюдений за режимом является выяснение изменений во времени ионно-солевого и газового составов, температуры, напорных уровней, расходов в отдельных участках (пунктах) месторождения (выработках, родниках). Наблюдения ведутся как в естественном состоянии месторождения, так и в условиях, когда естественный режим его нарушен разведкой и эксплуатацией.

Наблюдения за режимом подземных (иногда и поверхностных) вод должны составлять существенную часть исследований в общем комплексе разведочных работ с самого их начала. При этом в число объектов наблюдений необходимо включать имеющиеся естественные источники, старые разведочные и эксплуатационные выработки. По мере завершения проходки и опробования разведочных выработок они должны включаться в наблюдательную сеть, если не подлежат ликвидации по серьезным техническим причинам. Виды и сроки наблюдений необходимо устанавливать в соответствии с гидрогеологическими условиями месторождения, режи-

мом водоотбора, климатическими условиями и другими факторами исходя из следующих основных положений.

Режимные наблюдения необходимы для того, чтобы судить о влиянии на состояние месторождения как естественных режимообразующих факторов (суточные, сезонные и более длительные климатические колебания, режим поверхностного стока и др.), так и деятельности человека, в частности бурения новых скважин, производства пробных и опытных откачек или выпусков и др. Основная гидрогеологическая задача, на решение которой должны быть направлены режимные наблюдения, заключается в том, чтобы дать характеристику и оценить происходящие при разведке изменения рельефа пьезометрических поверхностей, распределение по площади и в вертикальном разрезе вод различной минерализации и состава, степень взаимодействия гидрогеологических выработок. Для этого необходимо определить дебиты динамические или статические уровни (избыточные давления), замерить температуры на изливе, отобрать пробы воды, установить на месте отдельные характерные компоненты ионно-солевого или газового составов воды. Наблюдения должны осуществляться в фиксированные сроки с частотой, обеспечивающей достоверную интерпретацию полученных закономерностей изменения тех или иных показателей в зависимости от поставленных задач.

Режимные наблюдения особенно важны, когда, оценивая эксплуатационные запасы, можно использовать эмпирические зависимости, полученные при опытно-эксплуатационных откачках. В этом случае информация об естественных колебаниях уровня обязательна для достоверной интерпретации данных, полученных в процессе опыта. Этим предопределяется необходимость организации режимных наблюдений в начале поисково-разведочных работ с тем, чтобы цикл их охватывал все сезонные колебания уровня и химического состава подземных вод.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Такого рода исследования включают прежде всего наблюдения за гидродинамическим и гидрохимическим режимами эксплуатации водозаборных сооружений, которые имеют большое значение для всех типов вод и месторождений и совершенно незаменимы на месторождениях со сложными гидрогеологическими условиями (II и III группы сложности). Две основные задачи, которые можно решить на основании этих наблюдений, касаются непосредственно эксплуатации месторождений: 1) уточнение эксплуатационных запасов (или подсчет их, если ранее он не был выполнен) и перевод запасов в более высокие категории; 2) выбор наиболее рационального способа эксплуатации с учетом экологических проблем (охраны подземных вод от истощения и загрязнения, а также защиты окружающей среды от негативного воздействия эксплуатации подземных вод). Анализ опыта эксплуатации позволят решать также

такие важные методические задачи, как оценка достоверности гидрогеологических прогнозов и усовершенствование методов разведки с целью повышения эффективности и оценки эксплуатационных запасов. Месторождения минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод за редким исключением отличаются сложными гидрогеологическими условиями и большими глубинами залегания, в связи с чем бурение поисково-разведочных скважин ограничено. Классификацией эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод узаконено проектирование водозаборных сооружений при таком соотношении различных категорий запасов, когда запасы высшей категории А не превышают 40 % для I группы месторождений, а для III отсутствуют вообще. Кроме того, в ряде случаев освоение месторождений промышленных вод допускается при меньших соотношениях. Таким образом, перевод эксплуатационных запасов в более высокие категории является насущной задачей для большинства месторождений при их реконструкции, расширении и т. д. Нередки случаи, когда требуется анализ причин неподтверждения гидрогеологических прогнозов, выполненных при оценке запасов. Представительные гидрогеологические наблюдения, связанные с эксплуатацией, позволяют существенно уточнить гидрогеологические условия, в первую очередь различного рода границы (литологические и тектонические экраны, фильтрационную неоднородность в отдаленных от скважин областях, боковое питание, перетекание между горизонтами и др.), которые трудно достоверно выявить в процессе разведочных работ вследствие их краткосрочности по сравнению с периодом эксплуатации. Анализ опыта эксплуатации ряда месторождений промышленных и минеральных вод, проведенный во ВСЕГИНГЕО, позволяет выявить недостатки гидрогеологических исследований на разрабатываемых месторождениях, а где оказалось возможным — решить некоторые из перечисленных задач. Отсюда можно сделать вывод о том, что состояние гидрогеологических наблюдений при эксплуатации большинства водозаборных сооружений неудовлетворительное. Создание специальной наблюдательной сети в проектах разработки большинства месторождений не предусмотрено или запланировано в недостаточном объеме без соблюдения требований к конструкции и оборудованию наблюдательных скважин. Практически для наблюдений используются единичные скважины, непригодные по каким-либо причинам для эксплуатации, т. е. чаще всего и для наблюдений тоже. Систематические наблюдения в итоге ведутся на большинстве водозаборных сооружений промышленных вод только за дебитом и содержанием полезных и вредных компонентов, в то время как на месторождениях минеральных вод, особенно небольших, они не проводятся вообще.

Исключение составляют наиболее крупные месторождения минеральных вод типа Боржомского, группы Кавказских минеральных вод (КМВ) и некоторые другие. Однако достоверность получаемых данных низкая. Как правило, наблюдения за положением уровней подземных вод (в виде устьевых давлений) организованы

на самоизливающих скважинах с помощью манометров, чувствительность которых обычно низкая. При высокой газонасыщенности устьевые давления к тому же не дают представления об истинных динамических уровнях.

И тем не менее даже при существенных недостатках современных гидрогеологических наблюдений выполненный анализ опыта эксплуатации 7 месторождений промышленных вод и 9 минеральных позволил существенно уточнить гидрогеологические границы некоторых из них и определить фильтрационные параметры водоносных горизонтов. Большинство из вновь выявленных границ играют весьма существенную роль в оценке эксплуатационных запасов. Например, на Челекенском и Нефтечалинском месторождениях промышленных вод установлена экранирующая роль многих тектонических нарушений, на Оверятском участке Краснокамского месторождения обнаружены перетекание из одного горизонта в другой и непроницаемые границы. На Боржомском месторождении минеральных вод анализ опыта эксплуатации оказался особенно сложной задачей вследствие крайне неравномерного отбора воды и низкого качества наблюдений, а переоценка эксплуатационных запасов несмотря на очень длительную эксплуатацию потребовала проведения большого комплекса гидрогеологических работ, в том числе и буровых. Боржомское месторождение является ярким примером того, как отсутствие качественных наблюдений приводит к неверным выводам о характере режима подземных вод и причинах уменьшения производительности скважин. Только упорядочение всей сети скважин и дополнительные гидрогеологические исследования по специальной методике позволили решить поставленные задачи.

Как установлено, эксплуатационные запасы углекислых вод этого месторождения не полностью обеспечены естественными ресурсами, а режим эксплуатации неустановившийся. Выявлены сильная неоднородность и анизотропия фильтрационного поля, следствием которой является замкнутость основного резервуара минеральных вод Вашлovани-Квибисского участка месторождения. Часть этих выводов носит предварительный характер именно вследствие неудовлетворительного качества наблюдений при эксплуатации.

Следует отметить такой вид исследований, как опробование эксплуатационных скважин перед вводом их в эксплуатацию, которое на современном этапе, как правило, выполняется неудовлетворительно. В то же время гидрогеологическое опробование вновь пробуренных скважин, особенно при выраженной неоднородности фильтрационного поля, играет большую роль в уточнении гидрогеологических параметров и определении оптимальных условий работы водозаборных сооружений в целом и для отдельных скважин. Фактически опробование сводится к весьма кратковременным пробным откачкам с таким комплексом наблюдений, который не позволяет определить не только гидрогеологические параметры, но даже статические уровни воды.

Для сложных месторождений минеральных вод преимущественно гидроинжекционного типа весьма перспективно применять и на эксплуатационных месторождениях комплекс глубинных исследований с целью изучения динамики изменения контуров минеральных вод. Суть этого метода будет изложена ниже.

Таким образом, насущной современной задачей является коренное улучшение гидрогеологических исследований в процессе строительства и эксплуатации водозаборных сооружений всех рассматриваемых типов вод. Поэтому следует разработать единые нормативные документы, в которых должны быть регламентированы виды, объемы и методика гидрогеологических наблюдений на стадиях строительства и эксплуатации водозаборных сооружений, и обеспечить контроль за их выполнением. Решению поставленной задачи будет способствовать создание специальной сети наблюдательных скважин, в том числе и в зоне влияния водозаборов. Во многих случаях можно обойтись без существенных материальных затрат, если использовать ранее пробуренные скважины.

Другим видом исследований на эксплуатационных месторождениях является эксплуатационная разведка, которая проводится с целью доразведки месторождений (новых участков, других водоносных горизонтов) и прироста эксплуатационных запасов промышленных категорий при расширении или реконструкции базирующихся на них предприятий. Виды и методика работ аналогичны проводимым на детальной стадии разведки и определяются конкретными задачами.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Глубокие подземные воды, как было уже сказано, характеризуются такими специфическими особенностями, как высокая температура, минерализация, насыщенность различными газами, радиоактивность, генетическая связь с глубинными разломами и т. д. Эти их свойства обусловливают возможность и высокую эффективность применения ряда специальных методов поисков и разведки месторождений, в том числе перспективных дистанционных. Это специальные аэросъемки (термометрическая, магнитная), газовая и эманационная съемки, тектонодинамический анализ, метод пространственного гидрогеологического моделирования и др.

Аэротермометрические и аэромагнитные методы исследований

Тепловая аэросъемка (ТАС) представляет интерес при поисках термальных и минеральных вод. Она является прямым поисковым методом, который позволяет выявить области разгрузки термальных и минеральных вод. На теплоаэроснимке термопроявления (горячие источники и ручьи, грязевые котлы, термальные площадки т. д.) выделяются очень ярким светлым тоном.

рушений, что существенно облегчит дальнейшие поисковые работы и позволит сосредоточить усилия на локальных участках территории. При этом не исключается возможность проведения площадных поисково-съемочных работ с некоторым объемом бурения на нескольких разрозненных территориях площадью до 0,5—1,5 км^2 каждая. Участки, где термоаномалии прослежены не были, могут быть обследованы при маршрутах, целью которых должен быть поиск площадей и отдельных проявлений термоминеральных вод, утративших свою первоначальную температуру и в силу этого не регистрируемых при термосъемке. Наиболее хорошие результаты аэротермометрии следует ожидать в районах Прибайкалья, Северного и Восточного Забайкалья, Памира, Тянь-Шаня, Алтая, Кавказа, Закавказья, Камчатки на гидростатически экранированных месторождениях. Согласно экономическим оценкам, применение методики аэротермомагнитной съемки, сочетаемой с ограниченными объемами наземных поисковых работ, существенно ускорит получение конечных результатов и снизит величину затрат.

Кроме того, преимущества ТАС перед наземными методами при изучении указанных типов вод выражаются в возможности: 1) получения гидрогеологической информации на значительных площадях в короткий промежуток времени; 2) ведения контроля за состоянием подземных и поверхностных вод с помощью аэросъемок.

В последние годы при изучении минеральных и термальных вод стали использоваться космофотоснимки, позволяющие выявлять тектонические нарушения, с которыми могут быть связаны

Однако сложная динамика температурного поля, формирующегося под действием ингаляции, существенно затрудняет дешифрирование термопроявлений. В дневное время это связано в основном с аномалиями рельефа, в ночное — с аномалиями за счет инверсии вода — суша. В связи с этим при выполнении поисковых работ на термальные и минеральные воды рекомендуется: 1) проводить ТАС в дневное время в условиях возможно меньшего прогрева и вторично в первую половину ночи; 2) сопоставлять дешифрирование дневных и ночных теплоаэрофотоснимков; последние с большей вероятностью позволяют исключить ложные аномалии за счет рельефа и использовать характерный дешифровочный признак термопроявлений — светлый фототон; 3) повторять детализационные полосы с настройкой каналов на разные уровни температурного поля с целью исследования внутренней структуры термальных полей, определения наиболее активных участков выноса тепла.

По данным дешифрирования всех теплоаэро- и аэрофотоснимков составляются схемы распределения термальных полей и полей разгрузки минеральных вод с выделением наиболее характерных участков. В ряде случаев на основании этих материалов удается прослеживать протяженность основных питающих трещинных систем.

По результатам аэротермометрии и аэромагнитометрии можно выявить ограниченные, температурно отличные зоны и участки на-

выходы термальных и минеральных вод (разгрузка). Основные преимущества космических методов — большая обзорность, интеграция и генерализация природных объектов по площади, оперативность получения информации, в том числе в труднодоступных районах, возможность получения принципиально новой информации, в частности о разломной тектонике, и т. д.

Тектонодинамический анализ. Детальные гидрогеохимические, газовые, термометрические и эманационные съемки

Эти виды исследований применяются на начальных этапах изучения (преимущественно на стадии детальных поисков, реже — предварительной разведки) для выявления участков локализации минеральной воды.

Для горноскладчатых районов очень важным новым элементом поисково-съемочных работ является тектонодинамический анализ, с помощью которого выявляются условия формирования и развития трещинно-разрывных систем и закономерности распределения тектонических дислокаций. Тектонические нарушения, как установлено, образуют в поле постоянно действующих напряжений земной коры определенные комплексы структурных форм. Напряжениями горизонтального сжатия субмеридионального направления обусловлен комплекс форм, сочетающий субширотные зоны сжатия, субмеридиональные зоны растяжения и диагональные зоны сдвиговых деформаций.

Характер тектонических деформаций и эволюции трещинных систем в значительной степени определяют гидрогеологические условия регионов. Тектонодинамический анализ — диагностирование кинематических типов тектоногенных деформаций по сопряженным системам сколовых трещин в зонах тектонических дислокаций. Знание закономерностей распределений тектонических дислокаций необходимо с целью прогнозирования наиболее вероятных участков локализации термоминеральных вод. Для месторождений гидроинжекционного типа и трещинно-жильных особенно важен анализ возрастного соотношения систем разрывных дислокаций различных генераций. Наибольший интерес представляют зоны развития поздних трещинных систем растяжения и пересечения дизъюнктивных систем различных направлений, одна из которых носит сдвиговый характер.

Детальные гидрогеохимические, газовые, термометрические и эмонационные съемки целесообразно проводить на месторождениях, представляющих собой очаг разгрузки минеральных или термальных вод, скрытый рыхлыми аллювиальными, делювиальными или элювиальными образованиями. В подобных условиях задача указанных съемок сводится к тому, чтобы установить местоположение зоны (фокуса) выхода подземных вод из коренных пород в рыхлые образования, или в зону экзогенной трещиноватости пород, и определить ее ориентировочно. С помощью съемок непо-

средственно выявляются участки, в которых отмечается максимальное влияние минеральной или термальной воды на состав грунтовых вод или почвенного воздуха, т. е. участки, представляющие собой несколько смещенную по потоку проекцию зоны разгрузки минеральной или термальной воды. Принцип проведения таких съемок один и тот же. На исследуемой территории разбивается густая сеть пунктов отбора проб воды или почвенного воздуха.

При гидрогеохимической съемке в этих пунктах закладывают неглубокие (на 1—2 м ниже зеркала грунтовых вод) выработки — шурфы или буровые скважины, из которых отбирают пробы воды для определения химического состава. Затем определяют общую минерализацию воды, если минерализация разгружающейся воды значительно выше минерализации грунтовых вод, и содержание 1—2 характерных компонентов состава минеральной или термальной воды, резко отличающих его от состава грунтовых вод, например, содержание хлорида или сульфата, свободной углекислоты. Если вода обладает повышенной температурой, то следует производить и замеры температуры грунтовой воды в выработках, т. е. одновременно с гидрогеохимической должна осуществляться и гидрогеотермическая съемка.

Детальная газовая съемка применяется в основном в тех случаях, когда разгружающаяся в рыхлые образования подземная вода является углекислой (содержит большое количество углекислого газа) или метановой. Фокус разгрузки такой воды проявляется не только повышенными количествами свободной углекислоты (метана) в грунтовых водах, но и высокими содержаниями их в почвенном воздухе. В связи с этим фокус разгрузки минеральной воды (углекислой или метановой) может быть выявлен в результате определения содержания в почвенном воздухе углекислого газа или метана в различных участках исследуемой территории по заранее разбитой сетке (профилям).

Эффективность такого рода исследований подтвердил опыт их использования при поисковых работах на углекислые воды в пределах Малого Кавказа и Предкавказья. Так, в Центрально-Севанской области по результатам газовой съемки в сочетании с тектонодинамическим анализом, дешифрированием космофото- и радиолокационных снимков выявлены наиболее перспективные типы тектонических нарушений и выделены участки, перспективные для постановки детальных поисковых работ. На Боржомском месторождении таким же способом оконтурены зоны разгрузки углекислых флюидов в приповерхностную зону.

В случае если разгружающаяся минеральная вода является радоновой, целесообразно применять эманационную съемку. Преимущество такой съемки заключается в том, что современные методы ее проведения позволяют определить интенсивность эманирования в короткие сроки и фактически в неограниченном числе пунктов (сеть точек опробования может быть весьма густой).

Среди гидрогеохимических методов исследований в последние годы получила развитие гелиевая съемка. В ходе выполнения гелиевой съемки в СССР была экспериментально доказана связь между концентрацией гелия в верхней части литосферы и глубинными проницаемыми разломами. Выявленная закономерность была зарегистрирована как научное открытие в 1969 г. (А. Н. Еремеев, В. Н. Башарин и др.). Гелиевая съемка стала широко применяться при структурно-геологическом картировании и решении ряда других задач, одной из которых является выявление обводненных зон (для Украинского кристаллического щита, Урала, Сев. Казахстана и др.). Многолетние режимные наблюдения и гелиевая съемка по всем основным водоносным комплексам Московского артезианского бассейна позволили оценить масштабы нарушений геологической среды в связи с созданием мощной депрессионной воронки. При изучении термальных и минеральных вод, по-видимому, следует рекомендовать проведение гелиевой съемки в сочетании с другими методами исследований (геофизические, гидрогеологические, гидрохимические и др.) для выявления водовыводящих разломов и обводненных зон.

По данным гидрохимических, термометрических, газохимических и радиометрических определений, полученных при соответствующих съемках, строятся карты распределения на исследованной площади содержания определявшихся компонентов состава грунтовых вод или почвенного воздуха. Участки с максимальным содержанием позволяют судить о распределении под рыхлыми образованиями фокусов разгрузки минеральной или термальной воды и, таким образом, определить места заложения разведочных выработок.

Метод гидрохимического геотермометра

Одним из специфических методов изучения термальных вод является метод гидрохимического геотермометра, рассмотренный подробно в ряде зарубежных и отечественных публикаций. Суть метода заключается в том, что по наблюдаемой на поверхности концентрации различных компонентов в термальных водах определяется температура равновесного раствора в глубинах гидротермальных систем. Прогноз основан на допущении химического равновесия водного раствора по всей области фильтрации термального потока от очага разгрузки до той глубины, где это равновесие формируется. В отечественной и зарубежной практике наиболее часто применяются два основных гидрохимических геотермометра — силикатный и натрий-калий-кальциевый. Теоретические предпосылки использования указанных компонентов для индикации температуры в недрах конвективно-циркуляционных гидротермальных систем изложены в работах Р. О. Фурнье и Дж. Роу, Р. О. Фурнье и А. Х. Трюсделла. В предложенной методике несколько неопределенной является та глубина, к которой следует отнести рассчитанную температуру, т. е. глубина формирования зоны си-

ликатного или натрий-калий-кальциевого равновесия восходящего термального потока. Некоторые исследователи называют температуру, рассчитанную с помощью гидрохимических геотермометров, «базовой», понимая под этим термином температуру жидкости в основании восходящего конвективного потока.

Однако, несмотря на допущения и условности, заложенные в методике, принципиальная возможность использования гидрохимических геотермометров может быть обоснована сравнительно удовлетворительной сходимостью расчетных температур с фактически установленной при разбуривании гидротермальных систем на Камчатке (Паратунская, Верхне-Паратунская и др.), а также на ряде зарубежных месторождений в США, Новой Зеландии, Исландии и др.

Методика расчета температур зоны силикатного T_{Si} и Na-K-Ca равновесия $T_{Na\ K-Ca}$ сводится к расчету температуры, который базируется на данных о содержании в водах термальных источников ионов Na^+, K^+, Ca^{2+}, почной и мономолекулярной SiO_2. При этом в расчетах используются химические анализы наиболее высокотемпературного выхода из каждой группы источников.

Основная расчетная формула для определения температуры зоны Na-K-Ca равновесия $T_{Na-K-Ca}$ имеет вид:

$$\lg N = \lg\left(\frac{Na}{K}\right) + \beta \lg\left(\frac{\sqrt{Ca}}{Na}\right),$$

где Na, K, Ca — концентрации ионов в воде, г-ион/л; N — константа равновесия реакции преобразования полевых шпатов в высокотемпературных условиях.

Коэффициент β колеблется от 1/3 до 4/3 в зависимости от стехиометрических чисел реакции. Практически он подбирается следующим образом. Вычисляется $\lg(\sqrt{Ca}/Na)$. При отрицательных значениях полученной величины β принимается равным 1/3, при положительных — $\beta = 4/3$. Температура зоны силикатного равновесия T_{Si} определяется по графику.

Температура (в °С) зоны Na-K-Ca равновесия рассчитывается по преобразованной формуле Сванберга.

$$T_{Na-K=Ca} = 164{,}7/(2{,}24 + \lg N) - 273{,}15.$$

Эту температуру можно определить также и по графику зависимости константы раствора N от температуры in situ, которая дана в градусах Кельвина К.

Изотопные методы исследований

В настоящее время изотопные методы исследований широко используются при изучении минеральных и термальных вод. Сущность изотопных методов заключается в том, что в результате физико-химических процессов и ядерных превращений изотопный состав элементов воды и растворенных в ней веществ приобретает характерные «изотопные метки», позволяющие прослеживать дина-

мику и эволюцию водных масс различных звеньев гидросферы во времени и пространстве. Изотопные методы исследований помогают решать некоторые задачи, связанные с выяснением общих условий и формированием минеральных и термальных вод, определением возраста изучаемых вод, выявлением областей питания и разгрузки подземных вод с изучением условий взаимодействия между водоносными горизонтами через слабопроницаемые слои. При изотопных исследованиях изучается распределение по площади и в разрезе стабильных и радиоактивных природных изотопов: дейтерия, трития, кислорода-18, радиоуглерода (13 C, 14 C), серы (32 S, 34 S), радона (220 Rn, 222 Rn), гелия (3 He, 4 He) и др. Эти исследования проводятся путем отбора проб подземных вод на устье скважин и на глубине с помощью глубинных пробоотборников и последующего их анализа. Интерпретация изотопной информации должна проводиться с учетом гидрогеологической обстановки, а также гидродинамических и гидрогеохимических данных.

Изотопные методы исследований успешно применялись при изучении месторождений минеральных вод Армении, Грузии, Дальнего Востока. Эти методы также использовались и при исследовании формирования термальных вод в районах Предкавказья, Мангышлака и других и парогидротерм Камчатки и Курильских островов. С помощью таких методов можно определить базовую температуру гидротермальных систем. В областях современного вулканизма взаимодействие углекислоты с подземными водами приводит к обеднению подземных вод кислородом-18. Подобное явление наблюдалось в термальных водах Ларделло. Для этого района была рассчитана базовая температура гидротермальных систем по данным об изотопном составе кислорода водяного пара и углекислого газа.

Метод пространственного гидрогеологического моделирования

Наиболее сложные задачи по расшифровке структурных, гидрохимических и гидродинамических условий возникают при поисках и разведке месторождений термоминеральных вод в горно-складчатых районах (трещинного, трещинно-жильного и гидроинжекционного типов). Здесь одна из главных задач в начале предварительной разведки — выявление протяженности и планового положения гидрогеологически активной части того или иного тектонического нарушения или любой другой трещинной водоносной системы. Задача эта тем сложнее, чем больше мощность маскирующих рыхлообломочных образований. Обычная методика разведки месторождений гидроинжекционного типа малоэффективна. Как было уже показано, основная их особенность заключается в наличии купола минеральных вод в зоне сочленения субвертикальной и пластовой водонапорных систем, границы которого весьма подвижны и зависят от соотношения гидродинамических параметров этих систем.

При интенсивных опытных работах или длительной эксплуатации исходные формы и объемы купола могут быть существенно искажены, хотя после восстановления первичных соотношений напоров пространственный характер различных водных потоков вновь восстанавливается.

В таких условиях разновременные откачки не дают истинной картины размещения в пространстве границ купола разгружающихся вод, и задача изучения гидродинамической и гидрохимической структур месторождений остается нерешенной. В этом случае эффективен метод пространственного временного гидрогеологического моделирования при соответствующей методике поисково-разведочных работ в целом. Данный метод базируется на изучении гидродинамического, гидрогазохимического, геотермического полей месторождений и их изменения во времени, а основное требование — это наличие соответствующей сети скважин (не только эксплуатационных, но и наблюдательных) и единовременность наблюдений. Пространственная гидрогеологическая модель — это графические построения (профили нескольких направлений и карты-срезы), позволяющие представить форму и объемы купола термоминеральных вод на фиксированный момент времени. Построение такой модели — основная задача на всех этапах исследований, а требуемая степень достоверности устанавливается стадией поисково-разведочных работ. Основной принцип при этом — получение информации о величинах гидродинамических, газогидрохимических, геотермических показателей в различных точках по вертикали и в плане. На поисковой стадии с этой целью используются данные поинтервального опробования скважин и результаты наблюдений за темпами прироста напоров в процессе их бурения. При разведке необходима сеть наблюдательных скважин, в которых относительно одновременно замеряются соответствующие показатели. Условием, которое редко соблюдается, является необходимость получения характеристики изменения таких показателей в пределах всего разреза по вертикали в зоне влияния глубинной разгрузки.Это возможно при наличии кустов скважин, пробуренных или оборудованных на разные горизонты, либо при применении глубинных методов исследований скважин, оборудованных на ряд горизонтов. Первый способ реально применим при неглубоком залегании купола минеральных вод (в основном в бассейнах грунтовых вод), второй — в многопластовых артезианских бассейнах. Глубинные исследования скважин включают отбор проб воды глубинными пробоотборниками на разных глубинах, расходометрию, термометрию, резистивиметрию, динамометрию, дающих непрерывную запись по стволу скважин. Сочетание этих методов и комплексный анализ полученных данных, как показала практика их использования на месторождениях Кавказских минеральных вод и Боржомском, высокоэффективно и позволяет достаточно надежно охарактеризовать изменение по вертикали минерализации, химического состава и газонасыщенности подземных вод, пьезометрических напоров, температур и соответственно выделить зоны водоприто-

ков. Если результатом поисковых работ являются довольно схематические представления о строении месторождений минеральных вод, то по данным предварительной разведки должно обеспечиваться построение (в первом приближении) пространственной гидрогеологической модели, т. е. серии карт-срезов на нескольких уровнях и сопряженных профилей для ряда наиболее информативных показателей (минерализации, характерных для данного типа вод компонентов химического состава воды и газа, газонасыщенности, температуры, напоров и др.). Только комплексный анализ данных о структуре гидрохимического, гидродинамического и геотермического полей обеспечит решение задачи о локализации, основных источниках и механизмах формирования термоминеральных вод, позволит выбрать перспективные участки, а также ориентировочно оценить их эксплуатационные запасы.

На стадии детальной разведки построение пространственно-временной гидрогеологической модели, отвечающей реальной природной обстановке, является единственным путем решения самого острого вопроса при разведке таких месторождений: обеспеченности эксплуатационных запасов естественными ресурсами, а соответственно, и проблемы прогноза качества. При детальной разведке уточняется модель, построенная по данным предыдущих исследований. В случае необходимости бурятся дополнительно разведочно-эксплуатационные и наблюдательные скважины. Основная задача на этой стадии — прослеживание изменения конфигурации купола в пространстве и времени в зависимости от водоотбора. Решение ее обеспечивается несколькими циклами наблюдений в процессе опытно-эксплуатационной откачки (выпуска), которая проводится как минимум при двух понижениях уровня.

Для прослеживания динамики движения границ купола необходимо на каждой ступени опыта иметь не менее 2—3 точек, т. е. 2—3 серий одновременных замеров в разных точках месторождения. Разрыв во времени в одной серии наблюдений не должен превышать нескольких суток. На больших месторождениях при нескольких моментах времени, для которых строится модель, весьма эффективно применение машинных методов обработки данных, позволяющих не только получить не менее 9 карт-срезов, но и определить величину площадей развития подземных вод разной минерализации (или по другому показателю) и объемов купола на каждый из моментов времени. Для Боржомского месторождения таким способом были получены схемы распределения минерализации подземных вод на 9 плоскостях среза с шагом между ними в 125 м, рассчитаны площади и объемы купола пород в пределах развития вод с различной минерализацией на 5 моментов времени при общей продолжительности наблюдений 2 года. Таким образом впервые получено достаточно ясное представление о гидродинамической и гидрохимической структуре Боржомского месторождения, где минеральные воды образуют в пределах продуктивной части разреза 3 купола с отдельными питающими каналами и имеют весьма подвижные границы.

В качестве иллюстрации исключительной важности целенаправленной обработки и интерпретации данных для создания гидрогеологической модели месторождения можно привести Шмаковское месторождение углекислых вод. Аналогичными построениями отчетливо выявлена многокупольная структура месторождения, а отдельные участки его приурочены к вершинам куполов, имеющих на глубине тенденцию к слиянию и соответственно гидравлически взаимосвязанных, что предыдущими исследователями при оценке запасов не учитывалось.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПАРОГИДРОТЕРМ

Опробование скважин с перегретыми водами отличается некоторой спецификой, обусловленной тем, что скважинами выводится на поверхность не термальная вода, а пароводяная смесь.

Глубина парообразования находится в сложной функциональной зависимости от температуры вскрытой воды, расхода и диаметра скважины. Каждой глубине преобразования соответствует определенное давление насыщенного пара при данной температуре. Количество пара в пароводяной смеси (ПВС) контролируется величиной энтальпии (теплосодержанием) и давлением в данной точке.

Давление насыщенного пара на устье скважины определяется, с одной стороны, тепловыми параметрами и расходом ПВС и, с другой — условиями выхода ПВС в атмосферу. Максимальное давление пара определяется температурой вод. Однако практически максимальное давление на устье пароводяных скважин всегда ниже расчетной величины. Это обусловлено тем, что парообразование в скважине происходит на большой глубине и во время подъема ПВС часть внутренней энергии пара расходуется на перенос воды и преодоление гидравлических сопротивлений при движении по стволу скважины.

В отличие от скважин с термальной водой, в которых динамический уровень воды при выпусках (откачках) находится только под атмосферным давлением, в пароводяных скважинах вода на глубине парообразования испытывает давление больше атмосферного на величину, равную давлению насыщенного пара при данной температуре. При этом каждой глубине парообразования соответствует определенный расход ПВС. На практике измеряют не глубину парообразования, а давление пара на устье скважины, которое легко регулируется с помощью задвижек; увеличение давления пара на устье сопровождается уменьшением глубины парообразования, что соответствует меньшему понижению динамического уровня, и наоборот. Более высокому давлению пара на устье скважины соответствует меньший расход ПВС и наоборот — максимальный расход ПВС отмечается при минимальном давлении, что наблюдается при полном открытии устьевой задвижки.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт разведки, производительность пароводяных скважин изменяется в очень широких пределах — от единиц до 80—100 кг/с. По величине расхода ПВС (в кг/с) все пароводяные скважины можно условно разделить на 3 группы: низкопродуктивные <10; среднепродуктивные — от 10 до 30—40; высокопродуктивные >30—40.

Комплекс исследований, проводимых при опробовании пароводяных скважин, включает как общепринятые для всех гидрогеологических скважин виды наблюдений и анализов, так и специфические виды исследований, в результате которых должны быть получены следующие параметры: давление пара на устье скважины; энтальпия (теплосодержание пароводяной смеси на выходе); производительность скважины; режим извержения пароводяной смеси при различных давлениях пара на устье; весовое соотношение воды и пара в пароводяной смеси; химический состав пара и воды.

Очень важной характеристикой пароводяных скважин является режим извержения пароводяной смеси. Основные сведения о режиме работы скважины дает запись давления пара на устье — диаграмма давления, которая производится непрерывно с помощью самопишущих манометров (рис. 44). По режиму извержения пароводяной смеси можно выделить 3 группы скважин: 1) с постоянным режимом извержения ПВС, в которых давление на устье сохраняется постоянным на каждой ступени работы скважины; 2) с пульсирующим режимом извержения, в которых давление в процессе извержения не остается постоянным, а все время колеблется, изменяются также расход и энтальпия ПВС; 3) прерывистым режимом извержения ПВС, в которых выбросы ПВС происходят лишь периодически — скважина работает в режиме гейзера и та-

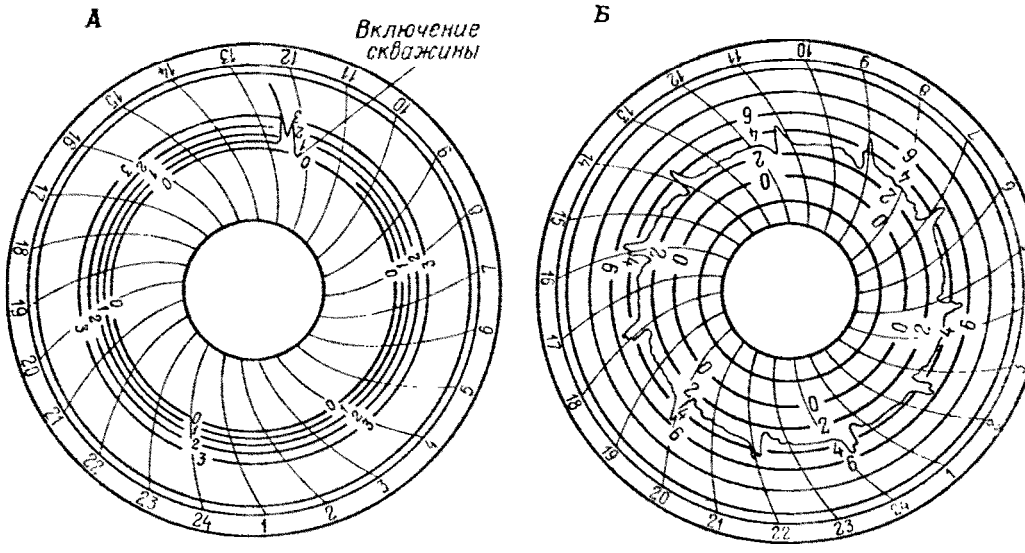


Рис. 44. Диаграмма давления пара на устье Паужетских скважин. *По В. В. Аверьеву.*

А — постоянный режим извержения ПВС; *Б* — разновидность пульсирующего режима

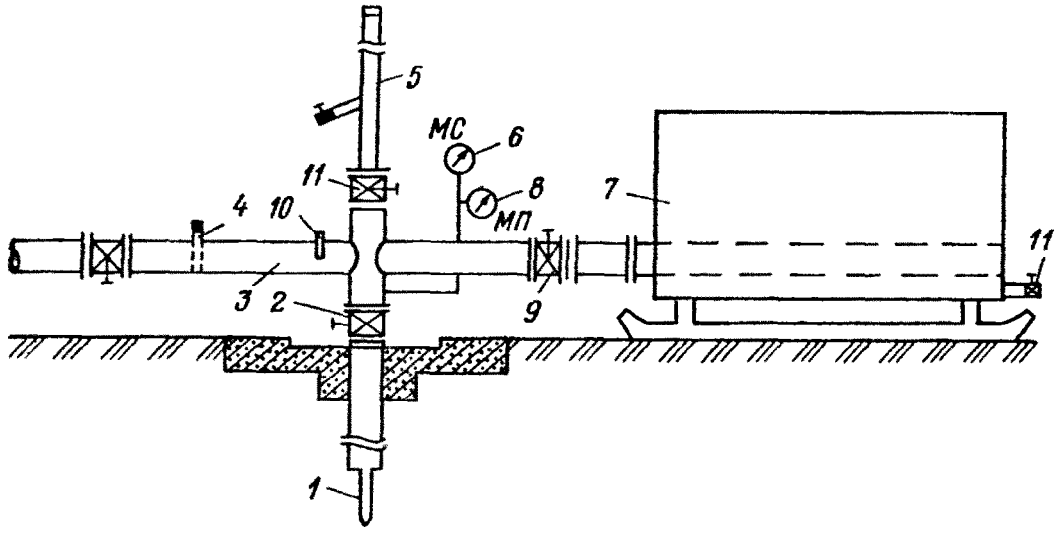


Рис. 45. Схема оборудования устья скважины при опытных и опытно-эксплуатационных выпусках.

1 — скважина; *2* — устьевая задвижка 200 мм; *3* — оголовок; *4* — пропорциональное устройство для подключения газоотделителя и отбора проб; *5* — лубрикатор; *6* — манометр самопишущий; *7* — колориметр; *8* — манометр показывающий; *9* — задвижка 200 мм; *10* — устройство для замера температуры ПВС; *11* — задвижка 150 мм

кой режим работы называется гейзерным. Пульсирующий и гейзерный режимы с непрерывно изменяющимися давлением, расходом и энтальпией ПВС крайне нежелательны при эксплуатации. Поэтому во время опытного выпуска исследуется возможность перевода скважины из пульсирующего режима извержения ПВС в постоянный. Пульсирующий режим работы скважины создается обычно в том случае, когда извержение ПВС не компенсируется притоком перегретой воды в скважину из водовмещающих пород. Следовательно, для стабилизации работы скважины необходимо уменьшить расход ПВС, что достигается прикрытием задвижки и увеличением устьевого давления.

Опробованию скважин предшествует подготовительный этап, который заключается в оборудовании устья (рис. 45) и обустройстве площадки для производства измерений. На пароводяных скважинах устья оборудуются помимо устьевой задвижки специальными оголовками-крестовинами с двумя боковыми отводами, один из которых используется для выпуска пароводяной смеси в атмосферу, а другой — для направления ее в измерительные устройства. На выкидной линии оголовка, по которой смесь отводится в атмосферу, с помощью специальной трубы крепится малый (переносной) циклонный сепаратор, предназначенный для отбора проб пара на химический анализ.

При подготовке к опробованию пароводяных скважин, как правило, предусматриваются специальные мероприятия по устранению шума, особенно при длительном выпуске пароводяной смеси. Для этого пароводяную смесь из скважины между замерами направляют либо в водоем, чем достигается полное устранение шума,

либо — в трубы с последовательно увеличивающимися диаметрами.

В связи с тем, что непосредственные измерения расхода в потоке пароводяной смеси затруднительны и не дают точных результатов, для опробования пароводяных скважин применяются специальные измерительные устройства, позволяющие предварительно либо сепарировать смесь на пар и воду (сепараторы), либо полностью конденсировать пароводяную смесь, приводя ее к однофазной среде (калориметры).

Как показала практика измерений, для скважин производительностью до 20—25 кг/с вполне достаточны калориметры объемом не более 6 м³. Однако при опробовании высокопроизводительных скважин для повышения точности замеров нужны калориметры объемом не менее 8—10 м³. Часто для измерения расхода ПВС используются специальные калиброванные съемные круглые диафрагмы, устанавливаемые на выкидной линии.

В результате замеров количества пароводяной смеси, поступившей в калориметр за определенный промежуток времени, и температуры в начале и конце наполнения определяется расход и рассчитывается теплосодержание пароводяной смеси:

$$Q = (M_к - M_н)/\tau;$$

$$I = 4{,}2\,[(M_к t_к - M_н t_н)/(M_к - M_н)],$$

где Q — расход пароводяной смеси, кг/с; $M_н$, $M_к$ — начальная и конечная масса воды в калориметре, кг; $t_н$, $t_к$ — начальная и конечная температура воды в калориметре, °С; τ — время производства замера; I — теплосодержание пароводяной смеси, кДж/кг (теплоемкость воды принимается равной 4,2 кДж/(кг·град).

Содержание пара в смеси определяется из соотношения

$$I = i_в(1 - I) + i_п \cdot P,$$

где $i_в$ и $i_п$ — теплосодержание воды и пара при замеренном давлении (табл. 66); P — содержание пара в 1 кг пароводяной смеси, кг.

Во время замеров особое внимание обращается на систему подключения скважины к калориметру и ввод в него пароводяной смеси. При пуске ПВС в калориметр режим извержения ПВС не должен быть нарушен, т. е. давление пара на устье должно оставаться таким же, как и до подключения калориметра. Иначе как бы ни были точны замеры, их нельзя уверенно отнести к какому-то определенному давлению пара на устье. Поэтому при подключении калориметра режим извержения ПВС тщательно регулируется с помощью задвижек на боковых отводах.

Расход пароводяной смеси, прошедшей через сепаратор, определяется расчетным путем — как сумма расходов воды и пара замеренных отдельно, а теплосодержание пароводяной смеси рассчитывается по формуле, приведенной выше. При этом содержание пара в 1 кг смеси определяется исходя из соотношения замеренных расходов воды и пара, а значения теплосодержаний $i_в$ и $i_п$ берутся из табл. 66.

Таблица 66

Соотношение между основными параметрами насыщенного пара.
По М. П. Вукаловичу и др.

t, °С	$P \cdot 10^1$, кг/м²	$0{,}24 \cdot i_В$, кДж/кг	$0{,}24 \cdot i_П$, кДж/кг
100	1,033	100,1	639,1
110	1,461	110,2	642,8
120	2,024	120,3	646,4
130	2,754	130,5	649,8
140	3,685	140,7	653,0
150	4,854	151,0	656,0
160	6,302	161,3	658,7
170	8,076	171,8	661,3
180	10,225	182,3	663,3
190	12,800	192,9	665,5
200	15,857	203,6	667,1
210	19,456	214,4	668,3
220	23,659	225,4	669,1
230	28,531	236,5	669,5

В комплексе с рассмотренными калориметрами сепараторами при опробовании пароводяных скважин может быть использован малый (переносной) циклонный сепаратор, о котором упоминалось раньше.

Для непосредственного измерения расхода пароводяной смеси в малодебитных скважинах применяют различные дифференциальные устройства. Простейшее из них представляет собой патрубок с установленными в нем диафрагмой или конической насадкой. Этот патрубок с помощью фланцев присоединяется к боковому отводу скважины. С помощью дифференциального устройства можно получить приближенные значения расхода пароводяной смеси, причем точность замеров зависит от режима извержения пароводяной смеси. При пульсирующем характере извержения их применение затруднительно и практически нецелесообразно. Опытный выпуск пароводяной смеси производится обычно при трех режимах работы скважины, соответствующих различным значениям давления пара на устье.

Наименьший расход скважины соответствует максимальному рабочему давлению, которое достигается предельно возможным прикрытием задвижки, когда дальнейшее прикрытие и, соответственно, уменьшение проходного отверстия вызывает уже спад давления. Максимальная производительность скважины, соответствующая минимальному рабочему давлению, достигается при полностью открытой задвижке. Следующая точка наблюдений соответствует некоторым промежуточным значениям давления и расхода. На каждой ступени давления производится не меньше 5—10 замеров расхода пароводяной смеси. По результатам измерений строится график зависимости $Q=f(P)$ (рис. 46), который являет-

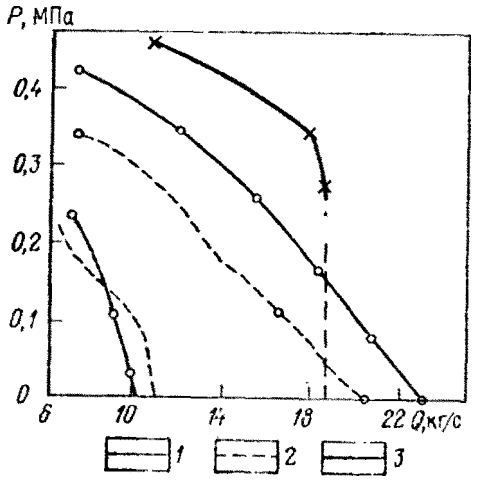


Рис. 46. График зависимости дебита Q от устьевого давления P.

Паужетское месторождение: *1* — при одиночных испытаниях без взаимодействия скважин, *2* — при взаимодействии скважин; *3* — месторождение Горячий Пляж

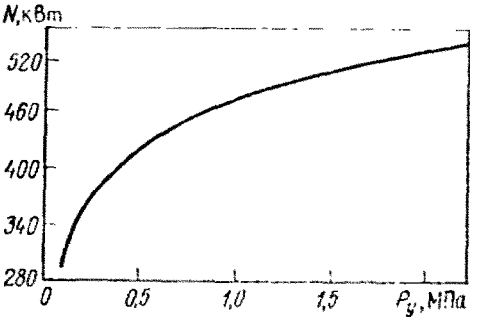


Рис. 47. График зависимости мощности ГеоТЭС от давления пара

ся важной характеристикой скважины, позволяющей выбирать оптимальный режим ее эксплуатации.

Следует отметить, что при переводе скважины с одного режима работы на другой стабилизация давления наступает не сразу и время ее зависит от производительности скважины: на высокодебитных скважинах давление стабилизируется в течение нескольких минут, на малодебитных — время стабилизации давления достигает суток и более. Выявление таких особенностей работы каждой скважины входит в задачу наблюдений при опытном выпуске. При испытаниях скважин с пульсирующим режимом, если в процессе выпуска не удается перевести скважину в постоянный режим работы, оцениваются средние (за сутки извержения) величины параметров — расхода, теплосодержания и давления пара на устье. Для оценки производительности скважин с пульсирующим режимом также строится график зависимости расхода ПВС от давления.

Пароводяные скважины используются в основном в энергетике и основной характеристикой их является давление пара на устье, определяющее рабочее давление турбины, которое должно оставаться стабильным. Поэтому опытно-эксплуатационный выпуск ведется при постоянном давлении пара на устье скважин с суммарным дебитом, близким к проектной производительности будущего водозаборного сооружения, и проводится до стабилизации расходов и теплосодержания пароводяной смеси в опытных скважинах, уровней и температуры — в наблюдательных. Оптимальное давление пара, при котором будет проводиться эксплуатация, определяется с учетом общего гидрогеотермального режима месторождения, размера и стоимости оборудования. Полученный пар с низким давлением требует увеличения размеров турбин и обо-

рудования, подводящего пар, что влечет увеличение его стоимости. Низкое давление на устье скважины обеспечивает получение максимального количества тепловой энергии.

Однако работоспособность единицы добываемого теплоносителя, или вырабатываемая им энергетическая мощность, при снижении давления пара уменьшается. На рис. 47 показано изменение мощности, вырабатываемой из 1 кг/с пара в зависимости от давления. Опыт проводился в условиях: $P_к = 0{,}005$ МПа, $\eta_{oi} = 0{,}65$, $\eta_м = 0{,}97$, $\eta_г = 0{,}99$. Наиболее значительное изменение мощности отмечается в диапазоне давлений 0,1—0,5 МПа: с ростом давления вырабатываемая электрическая мощность увеличивается на 40 %, дальнейшее увеличение давления не приводит к существенному росту вырабатываемой мощности. В итоге, выбор оптимального давления эксплуатации месторождения обусловлен не только соображениями обеспечения максимальной энергетической мощности, но и стоимостными факторами, как например, затраты на бурение, стоимость строительства трубопроводов, электростанции и др. На эксплуатируемых месторождениях ПВС подаваемое на турбины геоТЭС давление обычно колеблется от 0,1 до 1,4 МПа, на паровых— этот интервал сужается до 0,4—0,8 МПа.

Мировой опыт разведки и эксплуатации паровых месторождений (или месторождений с преобладанием пара) ограничен в основном двумя месторождениями — Лардерелло в Италии, эксплуатируемом с 1904 г., и Гейзеры — в США, эксплуатируемом с 20-х годов. В последнее десятилетие к ним присоединились месторождения Мацукава в Японии, Кава Камоджанг в Индонезии. Сейчас разведуется еще ряд паровых месторождений и месторождений перегретых вод с паровой шапкой. Для паровых месторождений характерно следующее.

1. Скважины выводят на поверхность сухой насыщенный или перегретый (ненасыщенный) пар. Некоторое количество жидкой воды первоначально сопровождает пар в отдельных эксплуатационных скважинах, но влажный флюид со временем обычно «осушается», а затем становится перегретым.

2. Первоначально пар, получаемый из еще неэксплуатируемой зоны месторождения, имеет температуру на устье скважины от 180 до 220 °С при давлении эксплуатации около 0,5 МПа, энтальпия пара обычно составляет 2810—2860 кДж/кг. В известных природных пародоминирующих системах перегрев пара может достигать 50 °С, а энтальпия перегретого пара 2940 кДж/кг при максимальной энтальпии насыщенного пара 2810 кДж/кг.

3. Резервуары с преобладанием пара характеризуются довольно однообразными температурами и давлениями (до эксплуатации): температура колеблется около 240 °С (236—239), а давление около 3, 4 МПа при содержании газа в паре не более 5 %. Эти параметры остаются сравнительно стабильными по всей глубине резервуара, начиная с 350—400 м.

4. Средняя производительность паровых скважин составляет 6—8 кг/с, максимальная достигает 20 (Гейзеры, США) — 28 (Тра-

вале, Италия) кг/с. Характерной особенностью паровых скважин является значительное снижение их производительности в процессе эксплуатации: в течение первых 5—8 лет эксплуатации продуктивность скважин падает на 50 %, за 20 лет — более чем на 70 %. Полагают, что одним из факторов, снижающих производительность скважин, является общее снижение давления в резервуаре. Это подтверждается и измерениями статического давления на известных паровых месторождениях. Не исключено, что наблюдаемое снижение расходов обусловлено и какими-то специфическими процессами, происходящими именно в паровых резервуарах при их эксплуатации и пока еще недостаточно изученными.

5. Начальные физические характеристики пара на длительно эксплуатируемом месторождении Лардерелло (Италия) изменялись довольно последовательно. Температура на устье и энтальпия пара закономерно увеличивались вплоть до достижения максимума, а затем в большинстве продуктивных зон начали снижаться. Аналогичные тенденции еще не были описаны для месторождений Гейзеры и Мацукава.

6. Эксплуатация ряда месторождений перегретых вод в Новой Зеландии (Вайракей, Бродлендс) с отбором теплоносителя примерно в 5 раз большим его природного восполнения привела к образованию искусственной «паровой шапки», исключительно близкой по эксплуатационным характеристикам к паровым месторождениям. По мере снижения давления в процессе эксплуатации отдельные скважины, продуцирующие прежде пароводяную смесь с обычной долей пара вскипания, определяемой начальной температурой и давлением на уровне вскипания, начали производить влажный пар с небольшим количеством воды. В итоге пар становился все более сухим, а его теплосодержание приближалось к 2810 кДж/кг, т. е. величине, свойственной насыщенному пару. Наблюдался также и перегрев пара в несколько градусов по Цельсию.

Расход пара определяется на основании параметров, замеренных с помощью специальных расходомерных устройств (рис. 48).

Согласно Правилам [41] регламентируются основы измерения расхода газов и жидкостей методом переменного перепада давления и общие технические требования к расходомерным устройствам, состоящим из расходомера (стандартного сужающего устройства — диафрагмы, дифференциального манометра для измерения перепада давления и приборов для измерения параметров среды) и прямых участков трубопроводов до и после сужающего устройства с местными сопротивлениями. В соответствии с Правилами, диафрагмами допускается измерять расход сухого и влажного пара при соотношении плотностей паровой $\rho_п$ и жидкой $\rho_ж$ фаз $\rho_п/\rho_ж \leqslant 0{,}002$ при массовой доле жидкого компонента в парожидкостной смеси не более 0,2, т. е. при влажности пара не более 20 %. Указанное соотношение плотностей паровой и жидкой фаз соблюдается при давлениях до 0,3685 МПа. Показания дифференциального манометра в этом случае соответствуют расходу сухой

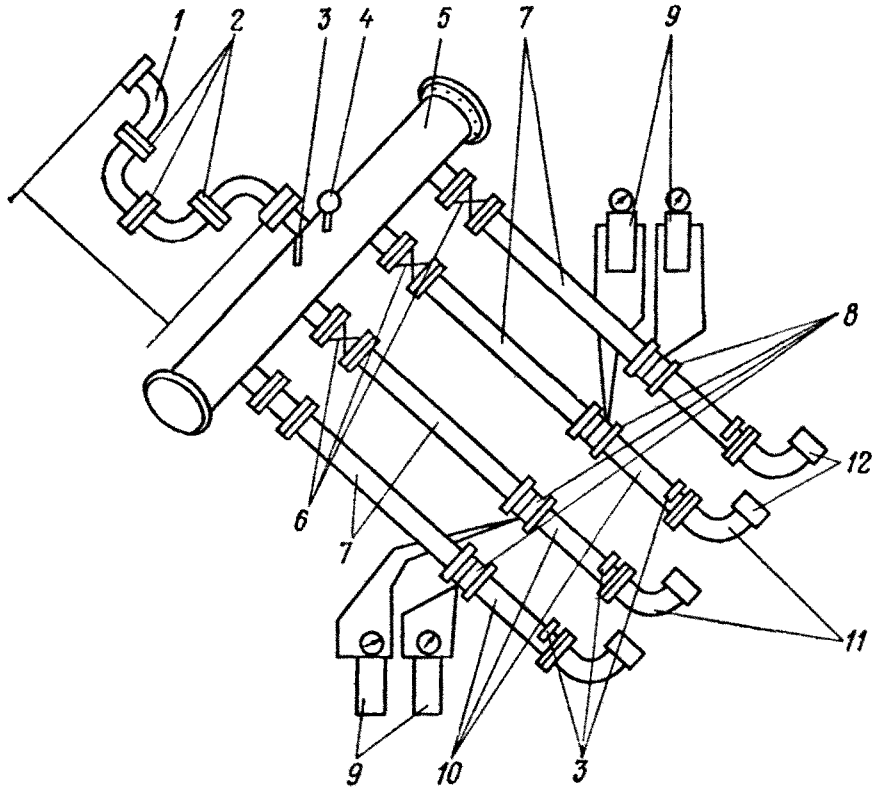


Рис. 48. Схема расходомерной установки РМУ-1.

1 — отвод; *2* — фланец свободный; *3* — термометр; *4* — манометр; *5* — коллектор; *6* — задвижка; *7* — труба подводящая; *8* — камера с диафрагмой; *9* — дифманометр; *10* — труба отводящая, *11* — труба выхлопная; *12* — насадка концевая

части влажного пара, в связи с чем диафрагмы рассчитывают по расходу и плотности паровой фазы. Несоблюдение указанных ограничений по влажности пара, т. е. измерение диафрагмами расхода с влажностью более 20 %, ведет к занижению замеренного расхода теплоносителя при завышении его теплосодержания.

Для уточнения расхода пара, измеренного с помощью стандартных диафрагм, при влажности пара до 30 %, П. П. Кремлевский, на основании опытов, предложил поправочный коэффициент $K=1+0{,}56У$, где $У$ — массовая доля влаги в смеси;

$$Q_{\text{ист}} = Q_{\text{замер}} \cdot K,$$

где $Q_{\text{ист}}$ — истинный расход влажного пара, $Q_{\text{замер}}$ — замеренный расход пара.

С целью выбора оптимального режима эксплуатации по результатам исследования паровых скважин, так же как и пароводяных, строится график зависимости расхода пара от давления на устье: $Q=f(P)$. На рис. 49 расходные кривые пологие. Это свидетельствует о том, что расходы скважин при повышении устьевого давления $P_у$ снижаются незначительно: в диапазоне рабочих давлений 0,1—1 МПа изменение расхода пара составляет не более 10—20 %.

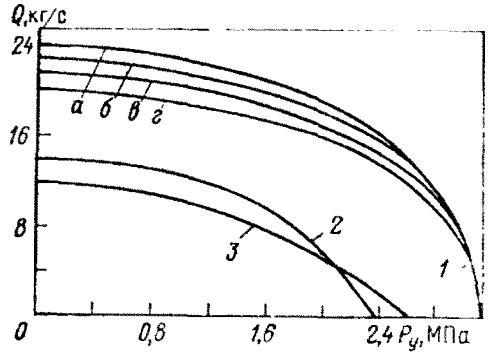


Рис. 49. График зависимости расхода пара от давления на устье.

1 — типичная паровая скважина глубиной 1500 м в Долине Больших Гейзеров с различными эквивалентными диаметрами труб (в мм): *а* — 305, *б* — 261, *в* — 241, *г* — 205; *2* — типичная паровая скважина в Лардерелло; *3* — Мутновское месторождение

В. И. Алексеевым и В. Я. Вороновицким, исследовавшими влияние на производительность паровых скважин гидрогеологических условий (пластовое давление, коэффициент продуктивности) и геометрических размеров скважин (диаметр и глубина), сделаны следующие выводы.

1. В области устьевых давлений 0,1—1,0 МПа влияние величины пластового давления на дебит пара проявляется незначительно.

2. Для малых значений коэффициента продуктивности изменение дебита от глубины притока в интервале глубин 600—1500 м для скважин диаметром до 0,2 м малозначительно, а для больших значений коэффициента продуктивности $c=10$ кг/с МПа влияние глубины становится существенно. Для больших диаметров скважин зависимость производительности от глубины притока исчезает. Это свидетельствует о незначительных потерях давления в скважине; все потери давления происходят в пласте.

3. Зависимость влияния диаметра скважины на дебит при разных значениях коэффициента продуктивности и глубинах скважин иллюстрирует рис. 50. Графики зависимости показывают, что имеется диаметр, при котором происходит как бы «насыщение» дебита пара — когда с ростом диаметра дальнейшего увеличения расхода не происходит. Это значение дебита ограничено коэффициентом продуктивности пласта. Из рис. 50 ясно, что для месторождений, характеризующихся коэффициентом продуктивности $c \leqslant 2$ кг/с МПа, скважины глубиной до 1500 м бурить диаметром выше 0,2 м нецелесообразно, так как дебит не будет увеличиваться.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения формирования ресурсов и химического состава подземных вод глубоких горизонтов необходимо наряду с региональными обобщениями и дальнейшим развитием теоретических гидродинамических и гидрогеохимических исследований проведение экспериментальных работ. В связи с тем, что специальные гидрогеологические исследования в натурных условиях проводить очень дорого, а использовать имеющиеся разведочные скважины на нефть и газ не всегда возможно, назрела необходимость моделирования фильтрационных процессов при больших давлениях и

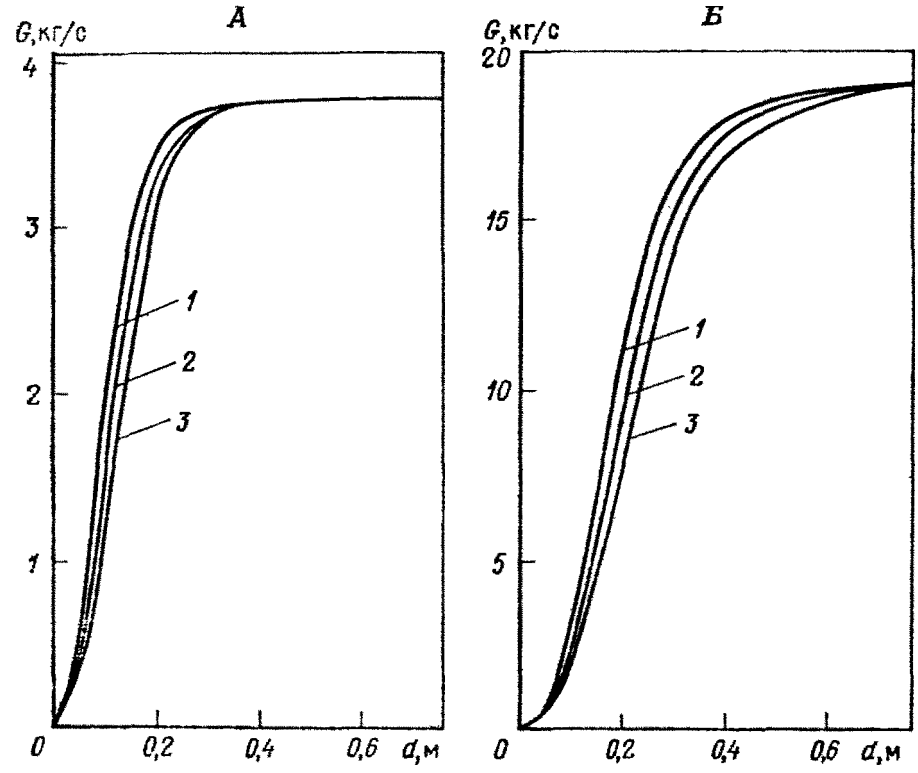


Рис. 50. Зависимость расхода пара от приведенного диаметра скважин при разных глубинах.

Глубина (в м): *1* — 620, *2* — 1000, *3* — 1500; пластовое давление $P_п$=2,5 МПа; устьевое давление $P_у$=0,6 МПа; коэффициент продуктивности *c* для варианта *А* — 2 кг/с·МПа, *Б* — 10 кг/с·МПа

температурах, а также воссоздания всевозможных физических полей, имеющих место в естественных условиях.

Для исследования физико-механических и коллекторских свойств горных пород и процессов, происходящих на больших глубинах, в СССР разработано большое число различных установок высокого давления, моделирующих состояние динамичной системы «порода⇄флюид» в пластовых условиях. Появление аппаратуры такого типа объясняется теоретическими выводами многих исследователей о необходимости учета внешнего и гидростатического давления при определении свойств кернов, поднятых с больших глубин. В. М. Добрынин показал на основании формулы Маршала, что преобладающее влияние на проницаемость оказывает давление, вызывающее сжимаемость порового пространства. Точнее, чем меньше сжимаемость породы, тем менее резко уменьшается безразмерная величина K_σ/K_0.

$$K_\sigma/K_0 = 1 - \varphi \cdot \beta_п \cdot F(\sigma),$$

где K_σ — значение коэффициента проницаемости при эффективном давлении σ ($\sigma = P_{геостат} - P_{гидростат}$); K_0 — то же, при $\sigma = 0$; $\beta_п$ — коэффициент сжимаемости породы; φ — величина, зависящая от сжи-

Таблица 67

Основные характеристики установок

Установки	Давление, МПа		Температура, °С	Рабочий реагент	Диаметр/длина керна, мм
	геостатическое	гидростатическое			
УИПК-1м	60	30	80	Вода пресная и минерализованная до 150 г/л; керосин, нефть	30/50
УИТС-2м	400	60	400	Вода минерализованная, газы, CO_2, N_2, Ar	10/100
СНИИГ и МС	150	100	300	Трансформаторное масло	40/50
МИНХ и ГП	150	25	250	Вода минерализованная до 230 г/л	16 40
УКН-2	100	60	400	Вода, керосин, нефть, газ	30/300
УВДИ-2000	200	150	600	Вода пресная	10/25
УИПВ	60	30	200	Вода дистиллированная и минерализованная, газ, смесь газа и воды	80/600

маемости пор; $F(\sigma)$ — зависит от давления на образец ($\sigma < < 170$ МПа).

Следует отметить, что не только исследования, направленные на изучение влияния давления и температуры на пласт-коллектор, но и изучение физических свойств воды привели к созданию установок высокого давления, моделирующих пластовые условия глубоких горизонтов. Характеристика некоторых установок такого типа приведена в табл. 67. Установки отличаются друг от друга пределами и способами развиваемых давлений и температур; видом создаваемого напряженного состояния; числом одновременно изучаемых параметров; качеством и состоянием фильтрующейся жидкости (или газа), а также размерами и видом кернодержателя.

Установка для испытания проницаемости кернов (УИПК-1 м) — единственная установка серийного производства (рис. 51). Гидростатическое давление возникает при движении пресса в системе, заполненной маслом: через поршень оно передается исследуемой жидкости, фильтрующейся через породу. Кроме того, масло через резиновую муфту со всех сторон сжимает породу, которая как бы подвергается геостатическому давлению. Имеющийся в установке второй пресс позволяет создавать противодавление выходящей из образца жидкости и проводить исследования при любых градиентах давлений. Термостатирующая жидкость поступает от термостата в полость между цилиндром и кожухом. Таким образом поддерживается заданная температура керна.

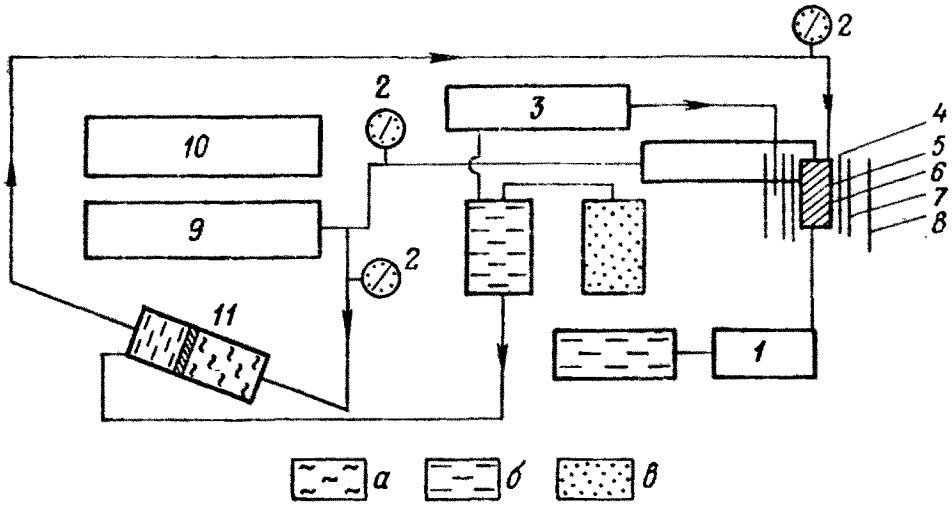


Рис. 51. Принципиальная схема УИПК-1м.

а — масло, *б* — вода, *в* — газ; *1* — пресс; *2* — манометр; *3* — термостат; *4* — диск; *5* — резиновая муфта; *6* — перфорированная гильза; *7* — стальной цилиндр; *8* — кожух с термоизоляцией; *9* — масляной пресс; *10* — ручной пресс; *11* — разделитель

Использовалась УИПК-1 м многими исследователями при решении задач на конкретных месторождениях. Наряду с этим проводились работы по изучению более общих проблем.

I. Под руководством В. М. Гольдберга (ВСЕГИНГЕО) изучались закономерности процессов фильтрации в глинистых породах: определялась степень влияния физико-химических и термодинамических условий на проницаемость глинистых пород. Испытания проводились на естественных каолиновых, монтмориллонитовых и слюдистых глинах. В качестве рабочего реагента брали дистиллированную воду и растворы солей. В результате получилось: 1) по всем видам фильтрующихся растворов с ростом минерализации от 0,5 до 15 г/л проницаемость глин возрастала в несколько раз; 2) при увеличении температуры от 20 до 80 °С проницаемость монтмориллонитовых глин возрастала на один порядок и более, каолиновых — в 2,6 раза, слюдистых — в 5,8 раза. Эти результаты объясняются тем, что под действием термобарического поля разрушается структура связанной воды, что приводит к уменьшению ее вязкости и снижению силы связи с поверхностью глинистых частиц. Поэтому мощность диффузионного слоя уменьшалась, а проницаемость соответственно возрастала; 3) наблюдался гистерезис проницаемости; 4) с ростом внешнего давления от 3 до 20 МПа у доломитов проницаемость уменьшилась в 1,8—2,7 раза, а у глин в 3,1—17,5 раза.

II. В. В. Покровский и др. усовершенствовали гидравлику установки, т. е. в отличие от стандартной на ней работают три независимых друг от друга пресса (соответственно три емкости), что позволяет подавать на керн воду, нефть и газ независимо друг от друга в определенных пропорциях. В результате исследований, на такой установке удалось разработать методику для определения

фазовой проницаемости. В настоящее время создается установка для таких исследований.

Помимо отработки методики определения фазовой проницаемости, В. В. Покровским проводились исследования по изучению влияния состава фильтрующейся жидкости на проницаемость кернов. Однако пока невозможно однозначно интерпретировать опыт из-за наложения влияния ряда факторов друг на друга в процессе эксперимента: неоднородности состава керна; степени очищенности жидкости от органики, которая забивает керн; различной степени разбухания глинистых частиц и др.

III. В. Ф. Индутин изучал влияние давления и температуры на физические и коллекторские свойства осадочных горных пород. В качестве рабочего реагента использовалась модель пластовых вод. Испытания проводились на различных типах осадочных горных пород, в результате чего В. Ф. Индутин установил, что: 1) литолого-петрографический состав пород влияет на физические и коллекторские свойства; 2) при повышении эффективного давления, сжимаемость гранулярных пород уменьшается: при $P_{эф}=5$—15 МПа — по линейному закону; при $P_{эф}>15$ МПа — по гиперболическому. Сжимаемость тем больше, чем выше глинистость и хуже отсортированность пород; 3) пористость уменьшается с нагрузкой и это уменьшение тем значительнее, чем выше глинистость пород.

Установка УИТС-2м разработана в Институте экспериментальной минералогии В. М. Шмоновым, Г. П. Зарайским и др. Она состоит из стального реактора, герметично завинчивающегося с двух сторон обтюраторами (рис. 52). Через левый обтюратор от пресса подводится вода для всестороннего обжима керна; через правый — пропущены капилляры к керну, который герметично заваривают в медную рубашку. Измеряя на выходе расход газа (воды) через керн, можно вычислить проницаемость керна. Реактор помещен в печку, с помощью которой создается нужная температура. Под-

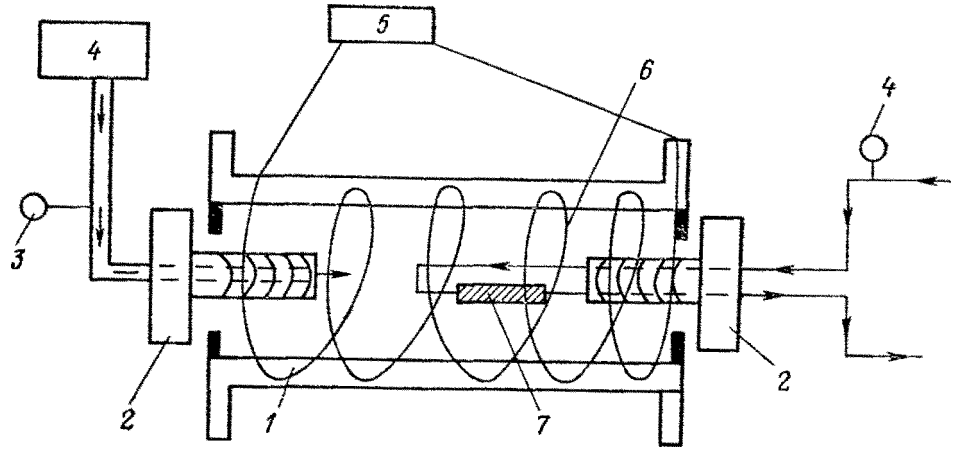


Рис. 52. Принципиальная схема УИТС-2м.

1 — стальной реактор; *2* — обтюратор; *3* — манометр; *4* — пресс; *5* — высокоточный регулятор температуры; *6* — спираль для подогрева; *7* — керн в медной рубашке

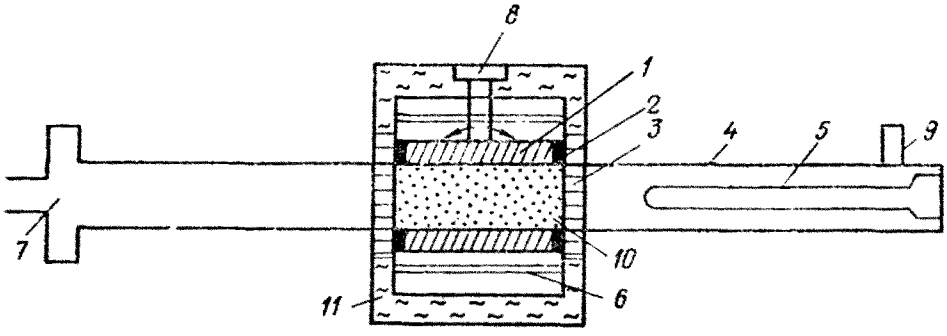


Рис. 53. Принципиальная схема кернодержателя установки СНИИГГИМС.
1 — фторопластовая гильза; *2* — цилиндр; *3* — нажимная гайка; *4* — пуассон; *5* — термопара; *6* — нихромовая обмотка; штуцер: *7* — выходной, *8* — обычный, *9* — входной; *10* — керн; *11* — теплоизоляционный материал

держивают температуру печки при помощи высокоточного регулятора ВРТ-3. К системе ВРТ-3 подсоединен контрольный самописец.

На УИТС-2м Г. П. Зарайский и В. М. Шмонов проводили эксперименты с целью имитации процессов метасоматоза. В работе использовались граниты и карбонатные породы. В качестве рабочего реагента брались природная вода и газ. В результате была рассчитана мощность скарновых зон нескольких месторождений.

Установка СНИИГГИМС (Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья) принципиально устроена так же, как и УИПК-1м, отличается она только устройством кернодержателя. Кернодержатель (рис. 53) состоит из корпуса, во внутреннюю полость которого помещается фторопластовая гильза *1* с испытываемым образцом горной породы. Гильза имеет самоуплотняющиеся манжеты. Для стабилизации гильзы и предотвращения ее разрыва при создании давления предусмотрены специальные цилиндрические устройства *2*, поджимаемые к торцам гильзы с помощью нажимных гаек *3*. Механическое сжатие образца по торцам осуществляется прессом через пуассоны *4*. Пуассоны *4* ввинчиваются в нажимные гайки *3*. Для осуществления фильтрации жидкости через весь объем образца на торцах пуассонов имеются концентрические сообщающиеся между собой канавки. В полости правого пуассона располагается карман под термопару *5*. Кернодержатель обогревается током с помощью нихромовой обмотки *6*. Заданный температурный режим автоматически поддерживается с помощью потенциометра. Жидкость поступает в кернодержатель через входной штуцер *9*, фильтруется через образец и удаляется через штуцер *7*. Жидкость, с помощью которой создается боковой обжим образца, подается в зарубашечную камеру через штуцер *8*. Корпус кернодержателя помещается в металлический кожух. Пространство между корпусом кернодержателя и кожухом заполняется теплоизоляционным материалом *11*.

На основе этой установки Ю. А. Афиногенов и В. В. Булатов разработали устройство для непрерывного контроля пористости и газожидкостной проницаемости пород в процессе эксперимента.

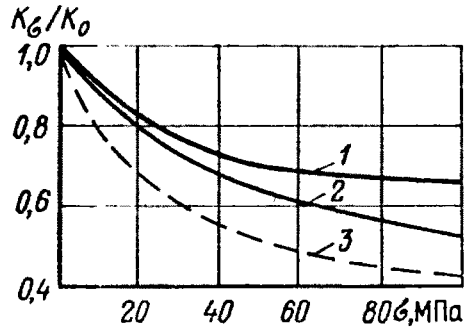


Рис. 54. График зависимости K_σ/K_0 от эффективного давления на породу при t=const
Температура (в °С): 1 — 20; 2 — 65; 3 — 200

Эти же авторы определили зависимость проницаемости от изменения эффективного давления. В качестве рабочего реагента применяли трансформаторное масло.

Как видно из рис. 54, величина K_σ/K_0 значительно уменьшается под действием эффективного давления. Это объясняется уменьшением площади сечения пор и усложнением конфигурации порового пространства под действием противоположно направленных давлений. Также была получена зависимость гидравлического радиуса пор r_0 от σ при t=const: $r_0(\sigma)/r_0 = 1/(1+27\cdot\sigma\,10^{-5})$.

Влияние температуры на проницаемость кернов изучалось авторами на образцах Кильватской площади при σ=2; 10; 20; 40 МПа. В результате получили: при наличии постоянного эффективного давления на испытуемый образец с увеличением температуры проницаемость уменьшается. Это объясняется уменьшением просветности пор образцов из-за снижения модуля упругости при нагревании породы. Незначительное изменение просветности вызывает изменение проницаемости в десятки и сотни раз, поэтому изменение физико-химических свойств жидкости (понижение вязкости при повышении температуры) оказывает менее значимое влияние на проницаемость.

Установка МИНХиГП (Московский институт нефтехимической и газовой промышленности им. И. М. Губкина). Принципиальное устройство этой установки не отличается от устройства УИПК-1м. Возможность развития более высоких термодинамических показателей достигается путем применения прочных металлов и контрольно-измерительной аппаратуры, рассчитанной на высокие температуры и давления. На такой установке Г. П. Ставкин проводил исследования по изучению влияния эффективного давления и температуры на проницаемость различных пород. В качестве рабочего реагента применял воду с минерализацией от 10 до 18 г/л. Зависимость $(K_\sigma/K_0) + \sigma$ оказалась сходной с результатом, полученным во СНИГГИМС.

В. Б. Мулин проводил такие же испытания, но только на полимиктовых песчаниках. Минерализация рабочего реагента 25 и 230 г/л. В результате было получено, что: 1) проницаемость полимиктовых песчаников с ростом эффективного давления уменьшается значительно и не восстанавливается при снятии этого напряжения, а для преимущественно слабосцементированных высокопористых образцов снижение проницаемости идет непрерывно. Такое явление не наблюдается для плотных алевролитовых пород; 2) коэффициент проницаемости по воде (σ=0) в 2 раза ниже, чем по

газу. Это объясняется образованием на поверхности породы адсорбционных полимолекулярных слоев, уменьшающих поперечное сечение поровых каналов, а также разбуханием глинистых частиц и проскальзыванием газа, 3) при $\sigma = 15 \div 20$ МПа происходит резкое уменьшение проницаемости.

Установка УКН-2 (коэффициента нефтеотдачи) разработана во ВНИИНефть. Принципиальное устройство ее такое же, как и у УИПК-1м. На УКН-2 изучали коэффициент нефтеотдачи на образцах многих месторождений нефти.

Установка УВДИ-2000 (высокого давления инфильтрационная) разработана в Институте экспериментальной минералогии (ИЭМ) Г. П. Зарайским. Принципиальное устройство такое же, как и у УИТС-2м. В отличие от последней, имеется предохранительный клапан, который контролирует противодавление, т. е. поддерживает постоянную разность давлений на концах керна.

Установка УИПВ (исследования промышленных вод) разработана во ВСЕГИНГЕО на базе УИПК-1м, которая для исследований дополнена специальным кернодержателем (рис. 55). В УИПК-1 м используется зажим керна ЗК-8 серийного производства (детально описан в ТО и ИЭ к АКМ-2). Недостатки ЗК-8 в том, что: 1) в него можно поместить только керн определенного размера (∅ 30 мм; $H = 50$ мм); 2) осевое и боковое давление на керн создается отдельно двумя вентилями, что может привести при $P_{бок} > P_{ос}$ к разрыву резиновой манжетки, в которой находится

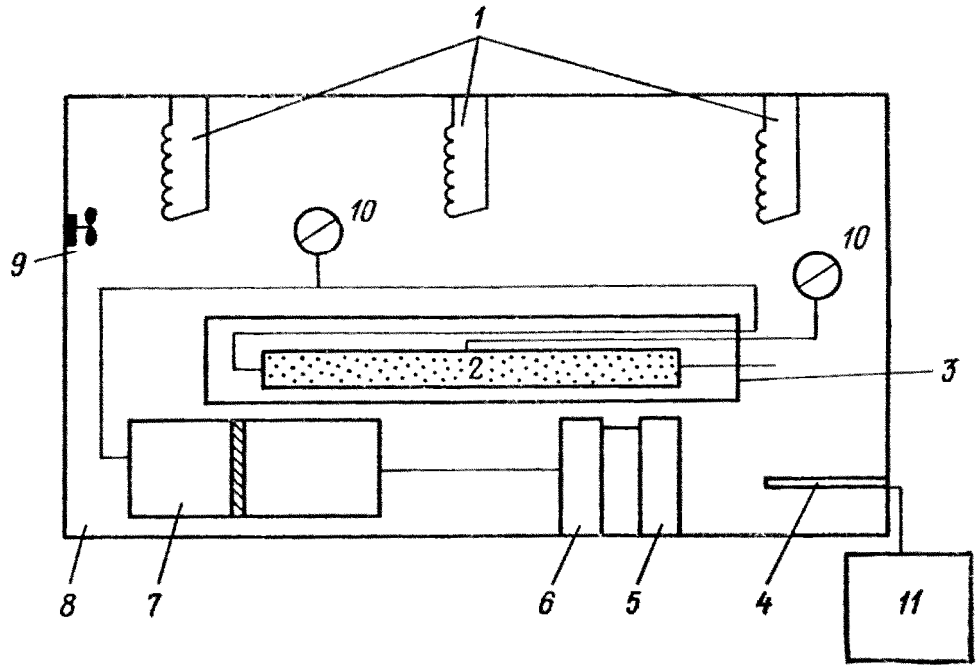


Рис. 55. Принципиальная схема УИПВ.

1 — тены, *2* — керн, *3* — кернодержатель, *4* — термопара, *5* — осушитель газа, *6* — емкость высокого давления; *7* — поршневой разделитель; *8* — термостатирующий шкаф; *9* — вентилятор; *10* — манометры; *11* — КСП

керн; 3) невозможно исследовать рыхлые и сыпучие породы в силу конструктивных особенностей ЗК-8. В связи с этим стало целесообразно использовать кернодержатель иной конструкции, уже применяющийся в ряде научно-исследовательских институтов Миннефтепрома, Мингео СССР и АН СССР. Его отличает то, что он проще в обращении и устраняет вышеприведенные недостатки. Размеры исследуемого образца могут колебаться от самых незначительных до $\varnothing = 80$ мм и $H = 600$ мм.

Для термостатирования в УИПК-1м применяется термостат ТС-16А с пределами температур от 20 до 80 °С. Термостатируются только зажим керна ЗК-8 и поршневой разделитель (контейнер) КЖ-6, закрытые кожухами, где между кожухом и внешней поверхностью транспортируется нагретая жидкость. Коммуникации открыты, поэтому флюид (газ, жидкость, смесь), проходя по ним, наверняка остывает. Нет гарантии, что в кернодержателе он нагревается до необходимой температуры. Для того, чтобы температура на всем пути движения флюида оставалась постоянной, коммуникации, кернодержатель, поршневой разделитель, а также емкость высокого давления (откуда флюид поступает в поршневой разделитель) поместили в термостатирующую емкость. Температура в емкости поддерживается и регулируется терморегулятором с выводом на КСП-4. Предел термостатирования увеличился от 80 до 100 °С. При замене имеющегося КСП-4 со шкалой от 0 до 100 °С на другой прибор со шкалой до 200, 300, 400 °С, соответственно, предел термостатирования будет увеличен. Принцип работы установки остается прежним.

Рассматриваемая установка предназначена для следующих видов работ: 1) изучения процессов массопереноса в различных физических полях при термодинамических параметрах, соответствующих условиям глубоких горизонтов; 2) исследования физико-химических процессов при фильтрации жидкостей (в том числе газированных) при высоких давлениях и температурах; 3) изучения фазовой проницаемости в условиях, приближенных к естественным, и влияния нарушения фазово-агрегатного состояния на процессы фильтрации; 4) исследований, направленных на получение методов увеличения производительности скважин путем воздействия на призабойную зону физическими полями (магнитным, электрическим), а также химическими реагентами.

Направление экспериментальных работ необходимо развивать и углублять. Целесообразно привлекать и результаты исследований в других естественных науках, что может существенно обогатить теорию и методику изучения процессов, происходящих в глубоких горизонтах.

Часть III

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Глава 10

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ПОНЯТИЕ ОБ ОСНОВНЫХ ВИДАХ РЕСУРСОВ И ЗАПАСОВ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В настоящее время о ресурсах и запасах подземных вод сложились достаточно четкие представления, хотя вопрос о классификации их остается в значительной степени дискуссионным. Из последних подробных классификаций запасов подземных вод следует отметить наиболее полную классификацию Н. М. Фролова и Л. С. Язвина, в которой запасы вод подразделяются по всем возможным признакам.

Хотя принципы классификации являются едиными для всех типов подземных вод, для вод глубоких горизонтов имеется некоторая специфика, связанная с особенностями их формирования. Дело в том что если для пресных подземных вод основное значение имеет формирование самой массы воды, то для глубоких вод помимо массы воды столь же существенны накопление полезных компонентов в промышленных водах, источник температуры (теплового потенциала) в теплоэнергетических водах, формирование газовой составляющей и бальнеологически активных элементов в минеральных водах. Процессы, приводящие к обогащению подземных вод полезными компонентами или их нагреву, обычно осуществляются за геологическое время. Эту особенность глубоких подземных вод существующие классификации не учитывают или учитывают недостаточно. Большинство классификаций базируется на генетической основе, и при всех терминологических различиях по смыслу классификации достаточно близки друг другу.

Запасы подземных вод как полезного ископаемого принято подразделять на естественные запасы и естественные ресурсы. В связи с народнохозяйственным использованием подземных вод было введено понятие эксплуатационные запасы. Интенсивная эксплуатация подземных вод выявила необходимость введения понятий об искусственных запасах и привлекаемых ресурсах (рис. 56).

Кратко рассмотрим содержание перечисленных понятий. Причем будем рассматривать сначала эксплуатационные запасы, так

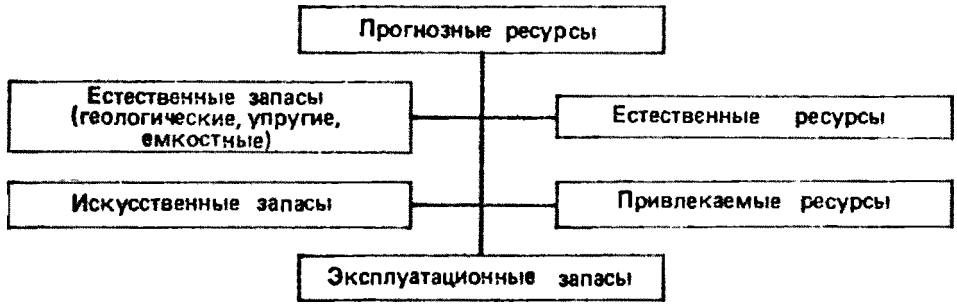


Рис. 56. Схема подразделения запасов и ресурсов подземных минеральных, термальных и промышленных вод

как другие виды запасов и ресурсов служат источниками обеспеченности эксплуатационных запасов, а количественная оценка последних — конечной целью геологоразведочных работ.

Эксплуатационные запасы подземных вод представляют собой количество вод, которое может быть получено на месторождении с помощью рациональных в технико-экономическом отношении водозаборных сооружений при заданном режиме эксплуатации и при качестве воды, удовлетворяющем требованиям ее целевого использования в народном хозяйстве в течение расчетного срока водопотребления. Эксплуатационные запасы выражаются в объемных расходах воды (в $м^3$/сут). Кроме того для промышленных вод подсчитываются запасы полезных компоиентов (в тоннах за расчетный срок эксплуатации), а для теплоэнергетических вод— массовые расходы пароводяной смеси (в т/сут) и теплоэнергетическая мощность (в ГДж, МВт, тоннах условного топлива). Эксплуатационные запасы на месторождениях различного типа обеспечиваются естественными запасами и ресурсами, искусственными запасами и привлекаемыми ресурсами. Естественные запасы следует рассматривать как массу подземных вод, заключенных в поровом пространстве продуктивных водоносных горизонтов внутри контура месторождения (участка), которая может быть высвобождена за счет гравитационных сил. Полная масса воды в поровом пространстве продуктивных горизонтов представляет собой геологические запасы, т. е. массу воды с учетом ее полезных свойств, сформированную за геологическое время. Геологические запасы включают и так называемые упругие запасы, высвобождающиеся из порового пространства при частичной или полной сработке пластового давления. В случае снижения уровня ниже кровли продуктивного комплекса может быть извлечена гравитационная масса воды, определяемая коэффициентом водоотдачи и объемом осушенных водовмещающих пород. Эта масса воды также является частью геологических запасов и может быть названа емкостными запасами. Следовательно, естественные запасы, участвующие в формировании эксплуатационных запасов подземных вод, складываются из упругих и в некоторых случаях емкостных запасов.

Для месторождений теплоэнергетических вод существует также понятие естественные запасы тепла, под которыми понимается теплосодержание продуктивного горизонта, определяемое объемом, плотностью, температурой и удельной теплоемкостью водовмещающих пород и заключенных в них подземных вод. Следует отметить, что если естественные запасы пресных вод (масса воды в горизонте) могут возобновляться, то естественные запасы минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод в артезианских бассейнах, как правило, не возобновляются. Естественные ресурсы представляют питание водоносного горизонта в ненарушенных эксплуатацией условиях и выражаются расходами воды (в л/с, м^3/сут). Естественные ресурсы являются основным источником обеспеченности эксплуатационных запасов месторождений минеральных и теплоэнергетических вод 3 группы сложности. Для теплоэнергетических вод следует учитывать естественные ресурсы тепла (тепловой поток), участвующие в формировании теплового потенциала месторождения.

Искусственные запасы возникают при разработке продуктивных горизонтов на месторождениях промышленных и теплоэнергетических вод с обратной закачкой использованных (отработанных) вод. Их следует понимать как дополнительное количество воды (полезных компонентов, тепла), которое может быть получено из продуктивного горизонта в сравнении с вариантом разработки без применения обратной закачки. На месторождениях теплоэнергетических вод для тепла может использоваться также термин искусственные ресурсы.

Привлекаемые ресурсы — это дополнительное питание (водное или тепловое) продуктивного горизонта в нарушенных эксплуатацией условиях. К привлекаемым ресурсам следует относить перетекание из смежных горизонтов, отжатие воды из глин, активизацию притока глубинной составляющей при снижении уровня, усиление инфильтрационного питания и др. Привлекаемые ресурсы тепла возникают вследствие охлаждения продуктивного горизонта и активизации теплопритока из окружающих пород или возрастания теплового потока за счет изменения градиента.

Соотношение между эксплуатационными запасами и источниками их обеспеченности может быть представлено следующим выражением:

$$Q_э = \frac{a \cdot v_е}{t_э} + bQ_е + \frac{c \cdot v_и}{t_э} + Q_{пр},$$

где $Q_э$ — эксплуатационные запасы; $Q_е$ и $Q_{пр}$ — естественные и привлекаемые ресурсы; $v_и$ — искусственные запасы; a, b, c — коэффициенты использования соответственно естественных запасов и ресурсов, искусственных запасов; $t_э$ — срок эксплуатации месторождения.

В заключение отметим, что методы количественной оценки перечисленных источников обеспеченности эксплуатационных запа-

сов минеральных, термальных и промышленных вод пока разработаны в недостаточной степени и в этом направлении проводятся интенсивные исследования.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАПАСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И КАТЕГОРИЗАЦИЯ

Из всех перечисленных видов запасов и ресурсов официально подсчитываются и учитываются эксплуатационные запасы всех типов подземных вод. Эксплуатационные запасы, утвержденные ГКЗ СССР или ТКЗ, являются основой для разработки схем развития отраслей народного хозяйства, добывающих и потребляющих подземные воды, составления годовых, пятилетних и долгосрочных государственных планов экономического и социального развития СССР, проектирования водозаборных сооружений и предприятий, использующих подземные воды (курорты, бальнеолечебницы, геоТЭС, тепличные комбинаты, заводы по извлечению полезных компонентов и др.).

Эксплуатационные запасы оцениваются по результатам разведочных гидрогеологических работ и на основании наблюдений при эксплуатации действующих водозаборов подземных вод.

Помимо эксплуатационных запасов в некоторых случаях оцениваются прогнозные ресурсы, которые отражают потенциальные эксплуатационные возможности артезианских бассейнов, гидрогеологических массивов, отдельных регионов. Они подсчитываются, как правило, на основе имеющейся геолого-гидрогеологической, геофизической и другой информации с использованием специальных методических приемов и отражаются на специальных мелкомасштабных картах совместно с эксплуатационными запасами. В государственном балансе они не учитываются, но используются при долгосрочном планировании поисково-разведочных работ на минеральные, термальные и промышленные воды, разработке генеральных схем их использования в народном хозяйстве, обосновании постановлений директивных органов.

Согласно действующей классификации [23], эксплуатационные запасы подразделяются по степени изученности и народнохозяйственному значению. По степени изученности эксплуатационные запасы подразделяются на разведанные и предварительно оцененные.

Разведанные запасы делятся на три категории А, В и C_1 в зависимости от степени изученности геологического строения и гидрогеологических условий месторождения, надежности определения расчетных гидрогеологических параметров и достоверности прогноза качества воды на расчетный срок эксплуатации, а также с учетом обоснованности источников восполнения. Запасы категорий А, В и C_1 служат основанием для проектирования водозаборных сооружений и предприятий по их использованию, выделения капитальных вложений на строительство.

Таблица 68

Балансовые запасы подземных вод в зависимости от группы сложности месторождения

Группа	Категории запасов, %		
	А+В	в том числе А не менее	C_1
1	80	40	20
2	80	20	20
3	70	—	30

Предварительно оцененные запасы относятся к категории C_2 и подсчитываются с целью оценки перспектив месторождения по весьма ограниченным фактическим данным. Подлежат утверждению одновременно с запасами категорий А, В и C_1, но при проектировании не учитываются.

По народнохозяйственному значению эксплуатационные запасы подразделяются на две группы — балансовые и забалансовые. Балансовые запасы используются в настоящее время и будут использоваться в ближайшей перспективе при существующей, либо осваиваемой промышленностью прогрессивной технике и технологии добычи и переработке воды с обеспечением необходимых мер в соответствии с требованиями по использованию и охране недр и окружающей природной среды. Забалансовые запасы не могут быть вовлечены в сферу народнохозяйственного использования по техническим, технологическим или экономическим причинам. Однако в перспективе должна существовать принципиальная возможность перевода их в балансовые. Балансовые и забалансовые запасы подсчитываются раздельно. Для забалансовых запасов указывается причина их отнесения к забалансовым. Эти запасы учитываются при доказанности возможности их последующего использования, т. е. перевода в балансовые.

По степени изученности месторождений решается вопрос о подготовленности их к промышленному освоению. Количественным выражением степени изученности служит соотношение запасов категорий А, В и C_1. Подготовленными к промышленному освоению считаются месторождения, если утвержденные балансовые запасы подземных вод с учетом группы сложности месторождения имеют соотношение запасов категорий А, В и C_1, приведенное в табл. 68.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Эксплуатационные запасы подземных вод устанавливаются путем расчета водозаборов, т. е. путем расчета суммарного дебита группы скважин, расположенных в определенном порядке. Каждая

из скважин имеет вполне определенный дебит и понижение динамического уровня воды в течение расчетного срока эксплуатации при сохранении качества воды, удовлетворяющего кондиционным требованиям. При расчете водозаборов подземных вод следует: 1) обосновать расчетную гидрогеологическую схему; 2) определить размеры эксплуатационного участка, т. е. участка водозабора; 3) обосновать рациональную схему расположения скважин в пределах эксплуатационного участка; 4) обосновать режим работы (дебитов и понижений динамических уровней) скважин водозабора в течение расчетного срока эксплуатации.

Схематизация природных гидрогеологических условий месторождения подземных, минеральных, термальных и промышленных вод при выполнении аналитических гидродинамических расчетов (включая расчеты на ЭЦВМ), а также аналогового гидрогеологического моделирования имеет весьма важное значение для правильной достоверной оценки эксплуатационных запасов. Такая схематизация предусматривает обоснование границ промышленной водоносной зоны по простиранию, а также в разрезе месторождения. Для выполнения аналитических гидродинамических расчетов природные гидрогеологические условия должны приводиться к сравнительно простым расчетным схемам. Использование аналогового моделирования позволяет в некоторых случаях более точно учесть природную обстановку за счет усложнения расчетной гидрогеологической схемы.

Для аналитических гидрогеологических расчетов различные плановые границы в пласте схематизируются в виде системы прямолинейных или круговых контуров, на которых задается либо постоянный напор (контуры постоянного напора), либо постоянный расход (контуры постоянного расхода), для глубоких водоносных горизонтов часто равный нулю. При неоднородном строении пласта (горизонта или комплекса) границы, разделяющие зоны с различными фильтрационными свойствами, также приводятся к контурам прямолинейной или круговой формы.

В расчетных схемах с целью оценки эксплуатационных запасов подземных вод задаются начальные и граничные условия, а также параметры пласта. Начальные условия — это условия распределения пьезометрических напоров (пластовых давлений) перед началом (или очередным изменением режима) эксплуатации водоносного горизонта или комплекса, т. е. условия, отвечающие состоянию установившегося (или близкого к установившемуся) движения подземных вод. Граничные условия характеризуют условия питания (и стока) на внутренних и внешних границах потока в плане и разрезе месторождения. Условия на внутренних границах (водозабор) задаются в виде функций дебита Q или напора H во времени, например: $Q=\text{const}$, $H=\text{const}$, $Q=f(t)$. Условия на внешних границах задаются для аналитических расчетов обычно в виде следующих схем граничных условий в плане.

1. Водоносный горизонт имеет в плане настолько большие размеры, что влияние эксплуатации водозабора в течение расчетного срока на его границах

практически не проявляется: такой пласт принимается бесконечным в плане. Эта схема называется неограниченным пластом.

2. Пласт ограничен в плане одним прямолинейным контуром: такую схему называют полуограниченным пластом. В этом случае возможны два типа условий, когда на границе пласта задаются постоянные: а) напор; б) расход, который в частном случае для непроницаемой границы равен нулю.

3. Пласт ограничен в плане с двух сторон прямолинейными контурами, пересекающимися под прямым углом (пласт-квадраит). В этих условиях возможны три типа расчетных схем: а) на обоих контурах напор постоянный $H=\text{const}$; б) на обоих контурах задан постоянный расход $Q=\text{const}$, в частном случае $Q=0$; в) на одном контуре имеет место постоянный расход (в частном случае $Q=0$), на другом — постоянный напор.

4. Пласт ограничен двумя прямолинейными параллельными контурами (пласт-полоса). На двух параллельных границах пласта принимаются три условия, указанные выше для пласта-квадранта.

5. Пласт ограничен с трех сторон перпендикулярными границами (пласт-полуполоса). На границах задаются те же условия $Q=\text{const}$, $Q=0$ или $H=\text{const}$ в любом их сочетании.

6. Пласт ограничен со всех сторон четырьмя перпендикулярными прямолинейными границами, на каждой из которых задается то или иное из указанных условий.

7. Пласт ограничен со всех сторон контуром, который может быть с достаточной для практических расчетов точностью приведен к круговому по принципу равенства площадей (пласт-круг); на границах кругового контура могут задаваться условия постоянного напора $H=\text{const}$ или постоянного расхода $Q=\text{const}$, $Q=0$.

Следует отметить, что все перечисленные схемы пласта имели место при оценке запасов подземных, минеральных, термальных и промышленных вод в различных районах СССР. Наиболее сложные расчетные гидрогеологические схемы принимались для месторождений, характеризующихся сложной тектоникой и наличием разрывных нарушений. При этом иногда в пределах одного эксплуатационного участка выделялись блоки, по своей конфигурации отвечавшие большинству из перечисленных схем.

Граничные условия в разрезе месторождений для наиболее часто встречающихся случаев в практике разведки и оценки запасов глубоких подземных вод схематизируются в виде напорного водоносного пласта с непроницаемой кровлей и подошвой. В этих случаях, обычно используются гидродинамические решения для плоской плановой фильтрации подземных вод. Однако встречаются случаи, когда эксплуатируемый напорный водоносный пласт отделяется от выше- и нижележащих водоносных горизонтов водоупорами, не исключающими фильтрации при снижении пластового давления (пьезометрического напора) в эксплуатируемом. В этих случаях рассматривается и при необходимости учитывается гидравлическая взаимосвязь водоносных горизонтов (перетекание). Иногда водоупорная кровля или подошва на отдельных участках месторождения в зоне влияния водозабора отсутствует, в связи с чем возможна прямая гидравлическая связь между соседними в разрезе водоносными горизонтами. При обосновании расчетной гидрогеологической схемы необходимо также учитывать разгрузку подземных вод в виде источников (или самоизлив пластовых вод из ранее пробуренных скважин). Особо сложными условиями для

оценки эксплуатационных запасов отличаются гидроинжекционные месторождения подземных минеральных вод. Являясь равновесными гидродинамическими и гидрогиохимическими системами в естественной природной обстановке, они чутко реагируют на изменение этих условий при эксплуатации подземных вод. Для таких месторождений важно выявить то количество воды разного качества, которое может быть отобрано из эксплуатационных скважин без изменения этого качества в течение расчетного срока действия водозабора. Точное решение этой сложной задачи обычно требует применения аналогового и математического моделирования.

Схематизация условий разработки месторождений при подсчете эксплуатационных запасов заключается в том, что скважины расчетного водозабора располагаются в виде удобных для выполнения гидродинамических или гидравлических расчетов правильных геометрических систем. К таким системам относится расположение скважин в виде: 1) одного или нескольких параллельных рядов (в частном случае — прямоугольная сетка) скважин; 2) двух линейных рядов скважин, образующих между собой некоторый угол (в частном случае — прямой); 3) одной кольцевой батареи скважин или нескольких кольцевых концентрических батарей; 4) равномерной треугольной сетки скважин, которая может быть приведена к системе кольцевых концентрических батарей. В качестве расчетной может быть принята также схема любого геометрически неправильного расположения скважин на эксплуатационном участке.

При схематизации гидрогеологических условий необходимо учитывать изменение параметров пласта (мощности, коэффициента фильтрации, водопроводимости) на площади эксплуатационного участка и месторождения в целом. Если амплитуда изменения этих параметров невелика, или в этом изменении нет четко прослеживаемых закономерностей, то для аналитических расчетов могут использоваться средневзвешенные по площади участка параметры и пласт в этом случае принимается условно однородным.

Размеры эксплуатационного участка (и, следовательно, площади проектного водозабора) определяются его геолого-тектоническим строением и гидрогеологическими условиями. При сравнительно однородном строении и фильтрационных свойствах водоносного горизонта и спокойном залегании их в пределах (и за пределами) эксплуатационного участка размеры площади водозабора зависят в основном от параметров промышленной водоносной зоны, поскольку они определяют дебиты отдельных скважин (с учетом их взаимодействия), их число и схему расположения на водозаборе. Показатели эксплуатации устанавливаются путем последовательных вариантных гидродинамических расчетов, сопровождаемых геолого-экономическим анализом, который проводится с целью выбора наиболее экономически эффективной системы разработки, обеспечивающей добычу максимального количества подземных вод при сохранении ее себестоимости на уровне допустимой стоимости.

Если эксплуатационный участок находится в пределах антиклинальной структуры с крутопадающими крыльями, площадь расположения скважин дополнительно определяется допустимой по экономическим соображениям глубиной бурения. Именно такими соображениями ограничиваются размеры водозаборов промышленных и термальных вод, располагаемых в пределах брахиантиклинальных структур в Западной Туркмении и Азербайджане.

При оценке эксплуатационных запасов глубоких подземных вод необходимо учитывать дебиты скважин и понижения в них динамических уровней от поверхности. И дебиты, и понижения уровней должны быть максимальными для гидрогеологических условий оцениваемого горизонта. Это обеспечивает, с одной стороны, наиболее полную оценку эксплуатационных запасов, с другой — наилучшие технико-экономические показатели эксплуатации водозабора. Однако практически в большинстве случаев расчетные дебиты скважин и понижения в них уровней от поверхности для промышленных и термальных вод приходится ограничивать мощностью насосного оборудования, выпускаемого отечественной промышленностью. Балансовые эксплуатационные запасы должны обеспечивать минимальную рентабельную производительность промышленного предприятия. Другими словами, расчетный дебит подземных вод с учетом концентрации полезных извлекаемых компонентов или количества тепла должен обеспечивать получение того минимума товарной продукции, при котором экономически целесообразно строительство современного индустриального предприятия.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод производится обычно тремя методами: балансовым, гидравлическим и гидродинамическим.

Балансовый метод основан на анализе приходных и расходных статей баланса подземных вод. Для промышленных подземных вод и термальных подземных вод платформенных областей, характеризующихся большой глубиной залегания, весьма малыми реальными скоростями фильтрации в естественных условиях, часто полным отсутствием проявлений на поверхности и обычно широким региональным распространением, оценка эксплуатационных запасов этим методом неприемлема. Однако для минеральных, термальных подземных вод горноскладчатых областей и парогидротерм областей современного вулканизма балансовые расчеты имеют часто весьма важное значение для оценки общих ресурсов таких вод и перспектив их использования на ранних стадиях гидрогеологических изысканий.

Гидравлический метод основан на изучении связи дебита и понижения динамического уровня при установившемся притоке подземных вод к одиночным и взаимодействующим скважинам. Оценка эксплуатационных запасов в этом случае производится путем гидравлических расчетов на основе экстраполяции полученных опытных данных. Этот метод широко применяется при оценке эксплуатационных запасов в сложных гидрогеологических условиях, не поддающихся простейшей схематизации для обоснованных гидро-

динамических расчетов (наличие водопроводящих тектонических нарушений, неравномерная трещиноватость и закарстованность пород, недостаточно точно установленные источники питания и закономерности распространения водоносного горизонта и т. д.). Гидравлический метод, требующий проведения мощных откачек с дебитами скважин, близкими к эксплуатационным, может быть рекомендован в редких случаях для месторождений промышленных вод на участках сложного тектонического строения и при разведке подземных вод в неравномерно трещиноватых и закарстованных породах. В то же время этот метод является основным при оценке запасов минеральных и термальных подземных вод в горно-складчатых областях и в районах сложного геолого-тектонического строения.

Гидродинамический метод широко используется для оценки эксплуатационных запасов подземных минеральных, термальных и промышленных вод. Метод основан на прогнозных расчетах изменения дебитов и уровней с учетом параметров водоносных пород, определяемых по данным опытных гидрогеологических работ в период разведки месторождений. Возможность и целесообразность использования такого метода определяется особенностями условий залегания и распространения подземных вод глубоких горизонтов артезианских бассейнов платформенного типа, предгорных и межгорных артезианских бассейнов.

Как известно, при откачках глубоких подземных вод в значительной степени проявляются упругие свойства вод и пород, что приводит к длительному неустановившемуся притоку подземных вод к скважинам. Интенсивность и характер изменения уровней и дебитов зависят от ряда факторов, основными из которых являются: 1) параметры водоносной зоны (водопроводимость и пьезопроводность) и изменение этих параметров на площади эксплуатационного участка и за его пределами в зоне влияния водозабора; 2) граничные условия месторождения и эксплуатационного участка, определяемые наличием областей создания напора, выклиниванием или резким изменением мощности или литолого-фациальных свойств водовмещающих пород; 3) суммарный дебит водозабора (и отдельных скважин) и изменение этого дебита в процессе эксплуатации.

Для глубоких подземных вод суммарный дебит водозабора должен быть постоянным (при постоянных концентрациях в воде полезных компонентов) или ступенчато изменяющимся во времени (при изменении в процессе эксплуатации месторождения концентраций полезных компонентов) в связи с необходимостью обеспечения стабильной производительности промышленного предприятия.

Исходя из изложенного оценка эксплуатационных запасов глубоких подземных вод на участке проектируемого водозабора производится следующим образом:

— по материалам бурения и опытного гидрогеологического опробования разведочных скважин оцениваются расчетные гидрогео-

логические параметры водоносных пород на участке водозабора и за его пределами;

— на основе анализа гидрогеологических условий месторождения в зоне возможного влияния водозабора схематизируются гидрогеологические условия и выявляются расчетные граничные условия;

— путем последовательных гидродинамических и технико-экономических расчетов по вариантам определяются кондиционные требования к подземным водам и условиям их эксплуатации;

— с учетом кондиционных требований подсчитывается возможный суммарный дебит водозабора применительно к наиболее рациональной для данных условий схеме водозабора; суммарный дебит квалифицируется как эксплуатационные запасы подземных вод;

— путем гидродинамических или гидравлических расчетов с учетом гидрогеохимической обстановки устанавливается постоянство или закономерности изменения состава подземных вод, концентрации в них полезных компонентов (тепла), или количество бальнеологически активных элементов.

В частных случаях, когда природная обстановка месторождения не позволяет обоснованно подсчитать запасы аналитическими методами, прибегают к моделированию процесса разработки месторождения и оценке эксплуатационных запасов с использованием аналоговых машин. Кроме того, аналитические расчеты эксплуатационных запасов целесообразно выполнять с использованием электронных цифровых вычислительных машин. Использование ЭЦВМ позволяет значительно расширить диапазон рассматриваемых вариантов разработки месторождений и решить задачу по одновременному гидродинамическому, гидрогеохимическому и технико-экономическому обоснованию эксплуатационных запасов глубоких подземных вод.

Гидродинамические методы подсчета эксплуатационных запасов подземных вод основаны на решении основного дифференциального уравнения упругой фильтрации жидкости в пористой среде. Решая это уравнение при различных начальных и граничных условиях, получают расчетные формулы для определения дебитов и уровней, которые используются с целью оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Математически и физически гидродинамические методы являются точными; практически их точность в достаточной мере условна вследствие приведения природной гидрогеологической обстановки к расчетным схемам, имеющим решение, а также в связи с неточностью исходных параметров, используемых в расчетах.

Основное уравнение движения подземных вод — линейное, что позволяет при его решении использовать метод суперпозиции (наложения течений). Этот метод заключается в том, что сумма решений такого уравнения также является его решением. Применительно к движению воды это означает, что понижение давления (напора) в любой точке пласта от действия нескольких водозабо-

ров равно сумме понижений в этой точке от действия каждого из них в отдельности.

Достоинством гидродинамических методов является то, что, будучи одновременно и балансовыми, они позволяют прогнозировать дебиты и уровни с большой степенью экстраполяции по сравнению с достигнутыми при проведении опытных гидрогеологических работ в скважинах. Возможность экстраполяции весьма важна, так как для глубоких подземных вод понижение уровней до расчетных проектных отметок при проведении опытных работ в скважинах нерентабельно, а с точки зрения точности оценки запасов излишне.

Решение задачи оценки эксплуатационных запасов подземных вод обычно сводится к определению дебита скважины или водозабора при заданном предельном понижении уровня, или к расчету понижения уровня в отдельных скважинах, а для системы скважин — к расчету наибольшего и наименьшего понижения уровня в отдельных скважинах водозабора, выбранных по условиям их расположения. При этом принимается, что начальные и граничные условия, а также параметры пласта известны, строение его однородно, а скважины совершенны.

Основной формулой, используемой для гидрогеологических расчетов неустановившейся фильтрации в условиях упругого режима, является формула (20), полученная для случая движения подземных вод к скважине в неограниченном в плане однородном водоносном горизонте. Для случая работы скважины с постоянным дебитом расчетная формула имеет вид:

$$S = (QR)\ 4\pi km,$$

где R — гидравлическое (фильтрационное) сопротивление, которое равно: $-E_i(-r^2/4at)$; r — расстояние от оси скважины; k — коэффициент фильтрации; m — мощность водоносного горизонта; Q, $Q(t)$ — дебит скважины; t — время; E_i — символ интегральной экспоненциальной функции, которая при $r^2/4at \leqslant 0{,}1$ может быть заменена логарифмическим приближением с точностью до 5 %.

Используя метод суперпозиции и формулу гидравлического сопротивления, можно провести расчет водозаборов для случая любого произвольного расположения скважин. В практике геологоразведочных работ встречаются следующие схемы расположения эксплуатационных скважин водозаборов: произвольное (неупорядоченное) расположение; линейный ряд; кольцевая батарея; треугольная сетка (концентрические кольцевые батареи); прямоугольная сетка (площадная система). Приведение системы расположения скважин к правильным геометрическим схемам позволяет упростить гидродинамические расчеты, что особенно важно при большом числе эксплуатационных скважин на участках водозаборов.

Выше отмечалось, что в практике оценки эксплуатационных запасов глубоких подземных вод возможность использования схемы

неограниченного пласта встречается довольно редко. Чаще при оценке запасов приходится учитывать внешние границы водоносного горизонта, схематизируемые в зависимости от их конфигурации, как это было сказано.

Неограниченный пласт. *Одиночная скважина с постоянным дебитом.* Для этого случая расчетная формула имеет вид:

$$S = \frac{0{,}183Q}{km} \cdot \lg \frac{2{,}25at}{r^2}. \qquad (47)$$

Величина r принимается равной расстоянию от оси скважины до точки, в которой определяется понижение S. При определении понижения уровня в скважине эта величина равна радиусу скважины.

Одиночная скважина с переменным дебитом. Если в пласте работает одиночная скважина с переменным дебитом и изменение ее дебита происходит ступенчато, то понижение в ней выразится уравнением

$$S = \frac{0{,}183Q_1}{km} \sum_{i=1}^{n} \alpha_i R_i, \qquad (48)$$

Здесь $\alpha_i = (Q_i - Q_{i-1})/Q_1$; Q_i — дебит скважины после i-го изменения, включая пуск; R_i — гидравлическое сопротивление, $R_i = -E_i\left[-\frac{r^2}{4a(t_p - t_i)}\right]$. В последней формуле t_p — полное время работы скважины от пуска до момента, на который определяется понижение; t_i — время работы скважины до i-го изменения дебита, включая пуск. Отсюда $t_1 = 0$ и $\alpha_1 = 1$. Если наибольшее значение $r^2/4at(t_p - t_i) \leqslant 0$, то формулу (48) с учетом формул для α_i и R_i можно записать следующим образом:

$$S = \frac{0{,}183Q_1}{km}\left[\lg \frac{2{,}25at_p}{r^2} + \alpha_2 \lg \frac{2{,}25a(t_p - t_1)}{r^2} + \ldots + \alpha_n \lg \frac{2{,}25a(t_p - t_n)}{r^2}\right]. \qquad (49)$$

После преобразований формула (49) принимает вид:

$$S = \frac{0{,}183Q_1}{km}\left\{(1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_n)\lg \frac{2{,}25a}{r^2} + \right.$$

$$\left. + \lg\left[t_p (t_p - t_2)^{\alpha_2} \ldots (t_p - t_n)^{\alpha_n}\right]\right\}, \qquad (50)$$

где $t_p (t_p - t_2)^{\alpha_2} (t_p - t_3)^{\alpha_3} \ldots (t_p - t_n)^{\alpha_n} = t_{пр}$ — приведенное время работы скважины с дебитом Q_1.

Взаимодействующие скважины. Если работает одновременно несколько скважин n с изменяющимся дебитом и разным во времени начала работы, то понижение уровня в любой точке пласта,

отстоящей от 1, 2, 3, ..., n скважин соответственно на расстоянии r_1, r_2, r_3, ..., r_n, определяется уравнением

$$S = \sum_{j=1}^{n} S_j, \tag{51}$$

где S — понижение уровня в точке от действия всех скважин; S_j — часть этого понижения, вызванная работой j-й скважины. Величина S_j устанавливается для каждой скважины по формулам (48), (49) и (50).

Практический интерес представляет случай работы всех скважин с постоянным дебитом Q_1, Q_2, Q_3, ..., Q_n. В этом случае, наиболее часто встречающемся при подсчетах запасов подземных промышленных вод, удобнее привести формулу к суммарному дебиту $Q_{\text{сум}}$ водозабора на расчетный момент времени. Тогда понижение в любой точке пласта определяется следующим образом:

$$S = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi km}\left\{\alpha_1 E_i\left[-\frac{r_1^2}{4a(t_{p_i}-t_1)}\right] + \alpha_2 E_i\left[-\frac{r_2^2}{4a(t_{p_i}-t_2)}\right] + \right.$$

$$\left. + \ldots + \alpha_j E_i\left[-\frac{r_j^2}{4a(t_{p_i}-t_j)}\right] + \ldots + \alpha_n E_i\left[-\frac{r_n^2}{4a(t_{p_i}-t_n)}\right]\right\}, \tag{52}$$

где $\alpha_j = Q_j/Q_{\text{сум}}$; t_j — время пуска j-й скважины; t_{p_i} — расчетное время от момента пуска первой скважины. Если $\frac{r_j^2}{4a(t_{p_i}-t_j)} \leqslant 0{,}1$, то вместо формулы (52) можно получить

$$S = \frac{0{,}183 Q_{\text{сум}}}{km} \lg \frac{2{,}25 a t_{\text{пр}}}{r_{\text{пр}}}, \tag{53}$$

где $t_{\text{пр}}$ — приведенное время работы водозабора; $t_{\text{пр}} = (t_{p_i}-t_1)^{\alpha_1}(t_{p_i}-t_2)^{\alpha_2} \ldots (t_{p_i}-t_n)^{\alpha_n}$, а $r_{\text{пр}}$ — приведенное расстояние до расчетной точки, равное: $r_{\text{пр}} = r_1^{\alpha_1} r_2^{\alpha_2} \ldots r_n^{\alpha_n}$. Если скважины пущены одновременно, то $t_{\text{пр}} = t$, а $r_{\text{пр}}$ определяется, как уже было показано. Если при этом одинаковы и дебиты скважин, то $t_{\text{пр}} = t$; $r_{\text{пр}} = \sqrt[n]{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot \ldots \cdot r_n}$.

При определении понижения в какой-либо скважине в приведенных формулах расстояние до нее заменяется радиусом скважины r_c. При этом учитывается несовершенство скважин по степени и характеру вскрытия пласта в соответствии с рекомендациями, изложенными в предыдущем разделе.

Для *линейного ряда скважин* при расположении их на равных расстояниях расчеты можно производить так же, как и для группы скважин в бесконечном пласте. Однако такие расчеты можно существенно упростить, используя метод, предложенный Ф. М. Бочевером в 1961 г. В соответствии с полученными им решениями при нечетном числе скважин $N = 2n+1$ в линейном ряду гидравлические сопротивления и, следовательно, понижения уровней определяются по формулам:

Таблица 69

Значения $F(B, \nu)$

B	1	2	3	4	5	6	10	20
0,05	4,74	8,08	10,7	12,7	14,3	15,6	18,8	20,7
0,01	4,04	6,72	8,64	10,0	11,1	11,9	13,4	13,9
0,02	3,35	5,38	6,69	7,55	8,13	8,47	8,97	9,03
0,04	2,68	4,09	4,87	5,28	5,5	5,61	5,7	5,7
0,1	1,82	2,53	2,79	2,87	2,87	2,9	2,9	2,9
0,2	1,22	1,53	1,6	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61
0,4	0,702	0,789	0,85	0,851	0,851	0,851	0,851	0,851
1	0,219	0,223	0,223	0,223	0,223	0,223	0,223	0,223
2	0,0489	0,0489	0,0489	0,0489	0,0489	0,0489	0,0489	0,0489
4	0,00378	0,00378	0,00378	0,00378	0,00378	0,00378	0,00378	0,00378

— при расчетах по центральной скважине ряда

$$R = \frac{1}{N}\left[2F(B, n) + \ln\frac{2.25at}{r_c^2}\right]; \qquad (54)$$

— при расчетах по крайней скважине ряда

$$R = \frac{1}{N}\left[F(B, 2n) + \ln\frac{2.25at}{r_c^2}\right]. \qquad (55)$$

В формулах (54), (55) $B = l^2/at$; $F = (B, \nu) = \sum_{k=1}^{k=\nu} E_i(-B_k^2)$.

Причем l — половина расстояния между равномерно расположенными скважинами; $\nu = n$ — для случая (54) и $\nu = 2n$ — для случая (55). Значения функции $F(B, \nu)$ приведены в табл. 69 ($\nu = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 20$).

При соблюдении условий $B \leqslant 0{,}1/n^2$ для центральной скважины и $B \leqslant 0{,}03/n^2$ для крайней скважины ряда формулы (54) и (55) заменяются с достаточной точностью логарифмической:

$$R = \ln\frac{2.25at}{\rho_s^2}, \qquad (56)$$

где ρ_s определяется из выражения

$$\rho_s = 2l\,(r_c\,2l)^{1/N}\varphi_s. \qquad (57)$$

Для центральной скважины ряда $\varphi_s = \varphi_0 = (n!)^{2/N}$, а для крайней скважины ряда $\varphi_s = \varphi_к = (2n!)^{1/N}$. Значение ρ_s представляет собой среднее геометрическое расстояние N скважин от центральной (или крайней) скважины ряда, равное радиусу большого колодца, имеющего такой же дебит, как все скважины, и такое же понижение уровня, как и крайняя (или центральная) скважина. Значения функций φ_0 и $\varphi_к$ приводятся в табл. 70. Схема линейной системы скважин в неограниченном пласте приведена на рис. 57.

Для случая расположения скважин в виде *кольцевой батареи* решение задачи дано В. Н. Щелкачевым. При постоянном во вре-

Таблица 70

Функции φ_0 и $\varphi_к$ для расчета линейного ряда скважин

N	φ_0	$\varphi_к$	N	φ_0	$\varphi_к$
1	1	1,26	22	8,61	16,10
2	1,32	1,89	23	9,00	16,80
3	1,67	2,56	24	4,42	17,50
4	2,03	3,25	25	9,75	18,25
5	2,39	3,96	26	10,12	18,95
6	2,75	4,65	27	10,50	19,70
7	3,11	5,37	28	10,90	20,40
8	3,48	6,08	29	11,23	21,15
9	3,24	6,81	30	11,61	21,85
10	4,21	7,51	31	12,00	22,55
11	4,57	8,82	32	12,35	23,25
12	4,96	8,96	33	12,71	24,00
13	5,31	9,69	34	13,10	24,70
14	5,68	10,40	35	13,60	25,45
15	6,06	11,12	36	13,84	26,15
16	6,43	11,90	37	14,22	26,85
17	6,78	12,60	38	14,60	27,60
18	7,16	13,25	39	15,00	28,30
19	7,52	14,00	40	15,35	29,00
20	7,39	14,70	41	15,71	29,70
21	8,25	15,40	42	16,10	30,45

мени дебите скважин (и, следовательно, суммарном дебите водозабора) снижение уровня в скважине определяется по формуле

$$S = Q_{сум} \cdot R_{кб}/4\pi km.$$

Представим полное гидравлическое сопротивление в виде суммы двух частных сопротивлений

$$R_{кб} = R_к + R_{скв}. \qquad (58)$$

Здесь $R_к = f(\ln f_0, \bar{r})$; при этом $f_0 = at/r_с^2$; $\bar{r} = r_к/r_с$.

Представляет интерес полученное Г. Ц. Тумаркиным решение для кольцевой батареи пущенных одновременно n скважин, расположенных в углах вписанного в окружность радиуса r_0 равностороннего многоугольника. В этом случае:

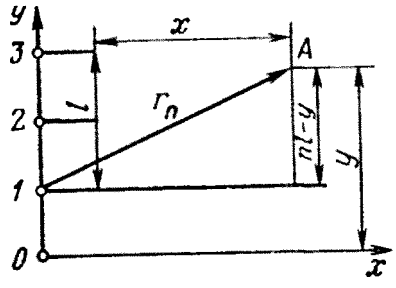


Рис. 57. Схема линейной системы скважин в неограниченном пласте.

1, 2, 3 — число скважин; *l* — расстояние между скважинами в ряду; *A* — точка определения гидравлического сопротивления *R*. r_n — расстояние от центра линейного расстояния до *A*

$$S \quad \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi km}\left[-E_i\left(\frac{r_c^2}{4at}\right)-\right.$$

$$\left.-\sum_{k=1}^{k=n-1} E_i\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right)\right]. \qquad (59)$$

Упростив формулу (59), получаем выражение

$$S=\frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi km}\left[\ln\frac{4at}{r_c^2}+\frac{1}{n}\ln\frac{r_k^2}{n^2r_c^2}+\right.$$

$$\left.+2\frac{r_c^2}{4at}-\frac{3}{2}\left(\frac{r_c^2}{4at}\right)^3\right]. \qquad (60)$$

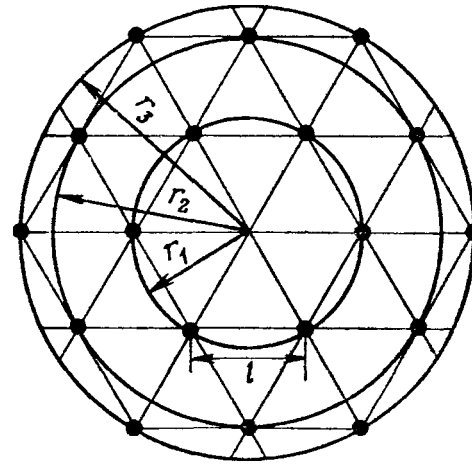


Рис. 58. Схема концентрических батарей скважин

При $at/r_c^2 \geqslant 1{,}5$ погрешность при использовании формулы (60), связанная с заменой бесконечного ряда лишь выписанными его членами, составит не более 0,5 %. Если $f_0=at/r_c^2 \geqslant 3$, что обычно соблюдается при расчетах водозаборов на длительный срок их эксплуатации, можно ограничиться двумя первыми членами ряда в формуле (60). Это обеспечит расчеты с точностью 5 % и более:

$$S=\frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi km}\left(\ln\frac{2{,}25at}{r_c^2}+\frac{1}{n}\ln\frac{r_к}{nr_c}\right). \qquad (61)$$

Равномерная треугольная сетка является одним из частных случаев площадных систем при упорядоченном расположении скважин. В таком случае все скважины оказываются на окружностях концентрических батарей (рис. 58), радиусы которых r_i в зависимости от расстояния между скважинами l приведены в табл. 71.

Таблица 71

Радиусы концентрических батарей и число скважин

Номер батареи	Радиус батареи R_i	Число скважин n	Общее число скважин A
1	l	6	6
2	$l\sqrt{3}$	6	12
3	$l\sqrt{4}$	6	18
4	$l\sqrt{7}$	12	30
5	$l\sqrt{9}$	6	36
6	$l\sqrt{12}$	6	42
7	$l\sqrt{13}$	12	54
8	$l\sqrt{16}$	6	60

Расчеты понижений уровней в скважинах производятся по следующим формулам:

$$S=\frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi km}R_{\text{п}};\quad R_{\text{п}}=R_{\text{скв}}+\sum R_{\text{внутр}}+\sum R_{\text{внеш}}. \tag{62}$$

Для точки на окружности рассматриваемой батареи скважин имеем:

$$R_{\text{б}}=\alpha_i\left[\ln\frac{4at}{r_i^2}+\frac{1}{n}\ln\frac{r_i^2}{n_i^2-r_{\text{с}}}+\frac{2r_i}{4at}+\ldots\right]. \tag{63}$$

Для точки, являющейся внутренней по отношению к рассматриваемым батареям скважин $r_0<r_i$, будем иметь уравнение:

$$R_{\text{внеш}}=\alpha_i\left[\ln\frac{4at}{r_i^2}+\frac{r_0^2+r_i^2}{4at}-\frac{1}{4}\frac{(r_i^2+r_0^2)+2r_i\cdot r_0}{4at}+\ldots\right]. \tag{64}$$

Для точки, которая будет внешней по отношению к рассматриваемым батареям скважин, т. е. для точки за пределами водозабора, формула имеет вид:

$$R_{\text{внутр}}=\alpha_i\left[\ln\frac{4at}{r_0^2}+\frac{r_0^2+r_i^2}{4at}-\frac{1}{4}\frac{(r_i^2+r_0^2)+2r_ir_0}{(4at)^2}+\ldots\right]. \tag{65}$$

В формулах (62)—(65) α_i — отношение дебита скважин i-й батареи Q_i к суммарному дебиту водозабора $Q_{\text{сум}}$; $R_{\text{п}}$ — полное гидравлическое сопротивление от действия всех кольцевых батарей скважин; $\Sigma R_{\text{внутр}}$ — суммарное гидравлическое сопротивление от действия кольцевых батарей, являющихся внешними по отношению к рассматриваемой точке пласта; $\Sigma R_{\text{внеш}}$ — гидравлическое сопротивление от действия концентрических кольцевых батарей скважин, являющихся внутренними по отношению к рассматриваемой точке пласта; r_0 — расстояние от центра системы скважин до точки, в которой определяется понижение уровня.

Для точки (скважины) в центре водозабора

$$R_{\text{п}}=R_{\text{скв}}+\sum_{k=1}^{k=l}R_{\text{внеш}\,i}; \tag{66}$$

для точки вне водозабора

$$R_{\text{п}}=R_{\text{скв}}+\sum_{k=1}^{k=i}R_{\text{внутр}\,i}; \tag{67}$$

для точки внутри водозабора

$$R_{\text{п}}=R_{\text{скв}}+\sum_{k=1}^{k=n}R_{\text{внеш}}+\sum_{k=1}^{k=i-n}R_{\text{внутр}}. \tag{68}$$

Прямоугольная сетка скважин предполагает равномерное геометрически правильное распределение их в пределах водозабора; расчетные решения для такой системы скважин получены Ф. М. Бочевером. Удобный метод расчета крупных водозаборов, разработанный Ф. М. Бочевером, метод обобщенных систем

взаимодействующих скважин, заключается в том, что реальная система скважин заменяется обобщенной системой источников—стоков определенной геометрической формы с дебитом, равномерно распределенным по всей обобщенной системе. Удобство применения метода обобщенных систем заключается в том, что гидравлическое сопротивление системы в целом $R_{об}$ остается постоянным, а гидравлическое сопротивление скважины $R_{скв}$ изменяется в зависимости от числа скважин и схемы их расположения. Это позволяет при необходимости рассмотреть много вариантов организации водозабора, что особенно важно при большом числе скважин.

Следует отметить, что подсчет эксплуатационных запасов подземных минеральных, термальных и промышленных вод требует обязательного учета числа скважин и их расположения. Часто геолого-структурные и гидрогеологические условия участков водозаборов глубоких подземных вод не позволяют использовать определенную геометрическую схему расположения скважин, а сравнительно небольшое их число заставляет рассчитывать дебиты и понижения уровней для каждой скважины. Поэтому в практике гидрогеологических расчетов при оценке запасов глубоких подземных вод по результатам геологоразведочных работ чаще используются точные гидродинамические методы. Метод обобщенных систем скважин целесообразно использовать на стадии региональной оценки прогнозных эксплуатационных запасов, а также при выборе схемы расположения большого числа скважин. Критерием выбора рациональной схемы расположения скважин будет являться минимальное значение $R_{скв}$ при заданных числе и суммарном дебите скважин, или максимальный дебит скважин при допустимом $R_{скв}$ и их числе.

Расчеты водозаборов в ограниченных пластах осуществляются с использованием метода зеркальных отображений, который заключается в том, что влияние на работу скважины или водозабора границ пласта аппроксимируется влиянием зеркально-отображенных от этих границ скважины или водозабора. Если граница непроницаемая, отображенный водозабор должен иметь тот же знак, что и реальный. В том случае когда граница пласта представляет собой контур постоянного напора, отображенная скважина или водозабор берутся со знаком, противоположным реальному. Другими словами, действие непроницаемой границы рассматривается как действие скважины (или водозабора), работающей в условиях взаимодействия с реальной, имеющей такой же дебит и отстоящей от этой реальной скважины на удвоенное расстояние (по нормали к границе). Аналогично предыдущему, действие границы с контуром постоянного напора рассматривается как действие нагнетательной скважины, работающей с тем же дебитом, что и реальная эксплуатационная, и отстоящей от иее на удвоенное расстояние до границы.

Наличие отображенных скважин или водозаборов усложняет гидродинамические расчеты главным образом в отношении их

объема. Содержание этих расчетов аналогично выполняемым для водозаборов в неограниченных водоносных горизонтах.

РЕГИОНАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКСПУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ И ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Цель региональной оценки прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод — определение того их количества, которое может быть добыто в пределах месторождения рациональными в технико-экономическом отношении водозаборами, расположенными в расчете на получение максимального суммарного дебита при условии одновременной работы водозаборов в течение расчетного срока эксплуатации и при качестве воды, удовлетворяющем требованиям их использования по назначению. Таким образом, региональная оценка эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод производится с целью выявления того их количества, добыча и использование которого экономически целесообразны с учетом современного уровня развития техники и технологии.

Региональная оценка эксплуатационных запасов позволяет установить не только общее количество того или иного типа подземных вод в пределах месторождений, но также определить потенциальные воможности каждого эксплуатационного участка, т. е. каждого участка водозабора, сопоставить условия и эффективность разработки каждого из них, выявить наиболее перспективные для постановки геологоразведочных работ и последующего освоения. Кроме того, региональная оценка эксплуатационных запасов дает возможность текущего и перспективного планирования размещения производственных мощностей по добыче той или иной продукции из подземных вод (и очередности ввода этих мощностей в действие), размещения бальнеолечебниц и предприятий по розливу минеральных вод, а также предприятий по использованию термальных вод и парогидротерм.

Количество эксплуатационных запасов региона зависит не только от общих гидрогеологических условий месторождений, но и от технико-экономических условий их разработки. Гидрогеологические условия определяют прежде всего глубину залегания водоносной зоны в пределах месторождений, возможные дебиты скважин и суммарные дебиты водозаборов, размеры площади последних, схему расположения скважин на отдельных участках. Технико-экономические условия эксплуатации определяют предельные понижения уровней воды от поверхности, а следовательно, и производительность скважин, способ их эксплуатации, стоимость добычи подземных вод.

В настоящее время размеры эксплуатационных запасов промышленных и термальных вод лимитируются в основном мощностью водоподъемного оборудования, определяющей дебиты отдельных скважин и понижения динамических уровней. Ограничение величины понижения уровней по техническим причинам при-

водит к тому, что подсчитываемые эксплуатационные запасы являются лишь частью общих ресурсов подземных вод месторождений. Вместе с тем, условия одновременной эксплуатации всех водозаборов в течение одного и того же расчетного срока эксплуатации в большинстве случаев практически невыполнимы. Это условие приводит к занижению реальных эксплуатационных запасов месторождений и отдельных участков. В связи с этим для каждого эксплуатационного участка (водозабора) целесообразно дополнительно оценивать эксплуатационные запасы без учета взаимодействия водозаборов, расположенных в пределах всего месторождения.

Региональная оценка эксплуатационных запасов в зависимости от геологического строения и гидрогеологических условий месторождений производится по-разному. Принципы и методы региональной оценки эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов весьма сходны для промышленных и термальных вод и существенно отличаются от минеральных. Для каждого типа вод принципы и методы такой оценки излагаются раздельно.

Промышленные подземные воды

В том случае когда водоносные горизонты или комплексы в пределах месторождения характеризуются выдержанным распространением и спокойным залеганием, эксплуатационные участки могут располагаться в пределах уже изученных бурением площадей и предполагаемых (по сумме полученных показателей и их экстраполяции) перспективных участков. Схема расположения эксплуатационных и перспективных участков в данном случае зависит от параметров водоносных пород и граничных условий месторождения, которые определяют эксплуатационные запасы подземных вод в пределах этих участков, размеры радиусов действия водозаборов, степень взаимодействия их при совместной эксплуатации и т. д. Подобные условия имеют место в большей части платформенных областей СССР, характеризующихся в целом небольшими амплитудами частных структур второго и третьего порядка.

В некоторых гидрогеологических районах водоносные породы залегают на больших глубинах и доступны для изучения и эксплуатации подземных вод только в крупных брахиантиклинальных или иных структурах (Западная Туркмения, Прикуринская впадина). В этом случае эксплуатационные и перспективные участки располагаются в пределах структур, выявленных путем бурения и геофизических исследований. При определении мест расположения эксплуатационных участков в пределах месторождений промышленных вод всегда необходимо учитывать наличие разведанных или эксплуатируемых залежей нефти и газа.

Прогресс техники в будущем и разработка новых типов высокопроизводительного насосного оборудования позволят более полно использовать ресурсы промышленных вод в отдельных рай-

онах. Оценка эксплуатационных запасов промышленных вод, дающая достаточно точное представление о возможном уровне развития промышленности на базе использования этих подземных вод в настоящее время, не позволяет судить о масштабах производства в будущем. Поэтому дополнительно к оценке эксплуатационных запасов целесообразно также дать оценку общих ресурсов промышленных подземных вод, под которыми следует понимать то их количество, которое может быть получено из водоносного горизонта или комплекса в течение заданного срока эксплуатации в расчете на полную сработку напоров, упругих запасов и в некоторых случаях частично запасов воды в водоносном горизонте. Ресурсы характеризуют максимальные возможности месторождения.

Выше уже отмечалось, что предельная глубина понижения динамического уровня определяется глубиной залегания водоносного горизонта или комплекса, производительностью и мощностью насосного оборудования. В связи с этим учтены следующие основные случаи подсчета эксплуатационных запасов подземных промышленных вод.

1. При глубоком залегании водоносной зоны, когда эта глубина заведомо превышает водоподъемную мощность насосного оборудования, предельная глубина понижения динамических уровней устанавливается с учетом технических возможностей насосных установок.

2. Если технически осуществимо понижение динамических уровней, по величине превышающее глубину залегания водоносного горизонта, то оно ограничивается глубиной залегания кровли водоносных пород или глубиной, определяемой с учетом частичной сработки подземных вод ниже кровли водоносных пород.

3. Если глубина залегания водоносных пород в пределах эксплуатационного участка претерпевает значительные изменения, то выбор предельной глубины понижения динамических уровней производится для различных частей участка по-разному.

Эксплуатационные запасы промышленных подземных вод на участке проектируемого водозабора оцениваются следующим образом. По материалам бурения и опытного гидрогеологического опробования разведочных скважин, а также геофизических данных производится оценка расчетных гидрогеологических параметров на участке водозабора и за его пределами. Анализ гидрогеологических условий месторождения в зоне возможного влияния водозабора позволяет схематизировать эти условия и разработать принципиальную расчетную схему. Путем последовательных гидродинамических и технико-экономических расчетов с использованием метода вариантов определяются кондиционные требования к промышленным водам и условиям их эксплуатации, включающие в частности: 1) концентрации в водах полезных компонентов; 2) минимальный дебит одной скважины; 3) максимальное понижение динамического уровня в скважинах к концу расчетного

срока эксплуатации; 4) температуру подземных вод на поверхности, а также требования технологического содержания.

Учитывая кондиционные требования к месторождениям, можно произвести подсчет суммарного дебита водозабора применительно к наиболее рациональной системе расположения эксплуатационных скважин. Этот суммарный дебит представляет собой эксплуатационные запасы промышленных подземных вод и квалифицируется по степени изученности в соответствии с требованиями ГКЗ СССР.

Региональная оценка прогнозных эксплуатационных запасов связана с некоторыми трудностями, обусловленными рядом следующих факторов. Изученность промышленных вод в пределах гидрогеологических районов и месторождений по площади их распространения и в разрезе водоносных пород неодинакова, что необходимо учитывать при оценке надежности гидрогеологических расчетов. По этой же причине, а также вследствие разнообразия гидрогеологических условий распространения месторождений подземных промышленных вод разработка единых универсальных методов оценки прогнозных запасов невозможна.

Месторождения промышленных подземных вод характеризуются обычно большими размерами и изменчивостью на площади месторождений общих гидрогеологических условий и параметров водовмещающих пород. Это обстоятельство, а также большое число водозаборов в значительной степени затрудняют прямое аналитическое решение задачи и заставляют прибегать к трудоемкому методу вариантов подсчета запасов.

При оценке эксплуатационных запасов промышленных подземных вод большое значение имеют технико-экономические показатели их добычи и переработки. Это препятствует использованию в полной мере методов подсчета запасов, разработанных применительно к неглубоким пресным грунтовым и артезианским водам.

В пределах части месторождения промышленных вод или отдельных его участков эксплуатационные запасы подземных вод могут оказаться непромышленными (забалансовыми). Например, из-за невозможности обеспечения существующим насосным оборудованием и необходимого понижения, установленного технико-экономическим анализом. Таким образом, при региональной оценке эксплуатационных запасов отдельных участков предельные понижения уровней в скважинах к концу расчетного срока эксплуатации устанавливаются с учетом мощности проектируемого насосного оборудования. Часть расчетного дебита (или полный дебит) водозабора, отвечающего условиям рентабельной добычи и переработки подземных вод, можно считать балансовыми (промышленными) запасами. Подобная оценка запасов имеет смысл, так как условия и экономическая эффективность разработки месторождений определяются не только их гидрогеологическими условиями, но также уровнем развития технологии извлечения полезных компонентов и техники добычи подземных вод из скважин.

При региональной оценке эксплуатационных запасов могут иметь место два основных случая. В первом случае эксплуатационные и перспективные участки заведомо известны, число их ограничено, а размеры месторождения определяются особенностями геологического строения и гидрогеологических условий территории. Такие условия имеют место: 1) когда участки водозаборов связаны с крутыми брахиантиклинальными структурами, за пределами которых водоносные отложения погружаются на глубины, недостижимые для вскрытия их эксплуатационными скважинами; 2) когда водоносные отложения не имеют сплошного распространения в пределах месторождения и эксплуатационные и перспективные участки приходится размещать в зонах, ограниченных по площади распространения достаточно проницаемых водоносных пород.

В этом случае эксплуатационные запасы промышленных вод подсчитываются по указанной схеме на каждом из выявленных бурением эксплуатационных или установленных косвенными методами (например геофизическими) перспективных участков. При близком расположении таких участков необходимы проверка степени их взаимодействия и уменьшение суммарных дебитов водозаборов пропорционально величине срезок уровней в эксплуатационных скважинах от взаимодействия. В качестве эксплуатационных запасов промышленных подземных вод в данном случае принимается суммарный дебит водозаборов, расположенных в пределах месторождения. При этом запасы подразделяются на балансовые и забалансовые.

Во втором случае проведение региональной оценки эксплуатационных запасов более сложно. Для этого случая соблюдаются условия сплошного распространения в пределах месторождений водоносного горизонта или комплекса с промышленными водами. При этом размеры эксплуатационных запасов определяются числом, схемой расположения и производительностью водозаборов подземных вод.

В условиях одновременного действия водозаборов, проектируемых на одинаковый срок работы, наибольший суммарный дебит может быть получен при бесконечно большом их числе (практически при расположении эксплуатационных скважин на площади всего месторождения и на расстояниях, определяемых величинами водопроводимости пород), при условии достижения к концу срока эксплуатации предельных технически возможных понижений динамических уровней. Вследствие значительного влияния технико-экономических факторов на результаты оценки запасов промышленных вод подобный способ расчетов в данном случае оказывается неприемлемым.

При региональной оценке запасов промышленных подземных вод следует помнить, что, во-первых, наиболее выгодными являются водозаборы, обеспечивающие предприятие достаточно большой производственной мощности; во-вторых, вследствие увеличения технологических затрат в себестоимости продукции при умень-

шении ее производства целесообразно ориентироваться на оптимальный с учетом указанного обстоятельства дебит водозабора; в-третьих, гидрогеологические (параметры водоносных пород, концентрации полезных компонентов, общий состав подземных вод), технические (использование того или иного типа насосного оборудования, конструкция скважин) и технологические показатели эксплуатации тесно связаны между собой. Число и дебиты водозаборов в пределах месторождения определяются, таким образом, необходимостью соблюдения условия рентабельности производства полезных компонентов и условием получения при этом максимального суммарного дебита всех водозаборов. Практически при размещении водозаборов и региональной оценке эксплуатационных запасов промышленных вод для второго из рассматриваемых случаев целесообразно придерживаться такой последовательности.

1. Для каждого из водоносных горизонтов (комплексов) путем расчетов устанавливаются минимальные промышленные концентрации полезных компонентов (редких металлов и рассеянных элементов) и оконтуривается площадь месторождения.

2. В пределах площади месторождения устанавливаются эксплуатационные участки с утвержденными ранее эксплуатационными запасами промышленных вод, а также месторождения нефти и газа (разрабатываемые и намеченные к разработке), с целью исключения взаимодействия их проектируемыми водозаборами промышленных вод.

3. Выявляются эксплуатационные участки, наличие которых подтверждено специальными гидрогеологическими буровыми и опытными работами, а также поисковым и разведочным бурением на нефть, газ и другие полезные ископаемые (например, термальные воды).

4. Для установленных бурением и опытными работами участков, принимая во внимание полученные параметры водоносных пород, для перспективных участков, характеризующихся различными сочетаниями концентраций полезных компонентов в воде и параметров пород, производится подсчет эксплуатационных запасов: а) с учетом кондиционных показателей и б) с учетом технических возможностей.

5. На основе анализа технико-экономических показателей извлечения полезных компонентов в заводских условиях в пределах рассматриваемого месторождения или для сходных по составу и минерализации вод на других месторождениях устанавливаются: а) стоимость технологической обработки 1 м^3 подземных вод для получения продукции; б) стоимость технологических затрат на производство продукции с учетом ее номенклатуры.

6. Принимая во внимание полученную стоимость технологической обработки 1 м^3 воды и концентрации компонентов в подземных водах различных эксплуатационных и перспективных участков, определяются: а) стоимость технологических затрат на получение полезной продукции; б) допустимая максимальная стоимость добычи 1 м^3 подземных вод как разность между отпускной

ценой продукции и технологическими затратами на ее производство, отнесенными к расходу воды; в) максимальная производительность водозабора, обеспечивающая рентабельное производство продукции.

7. Для полученной максимальной производительности водозаборов определяется расчетное эксплуатационное понижение динамических уровней. Разница между предельным максимальным и полученным расчетным понижениями уровней для рассматриваемого водозабора определяет возможные размеры суммарной срезки уровней от действия всех других водозаборов в пределах месторождения.

8. Дальнейшая оценка эксплуатационных запасов промышленных вод сводится к размещению в пределах месторождения водозаборов с таким расчетом, чтобы срезки уровней при совместной их работе не превышали полученных суммарных расчетных величин. При этом должны учитываться также и граничные условия месторождений.

9. Проверка возможности получения установленных таким образом дебитов водозаборов и суммарного дебита месторождения производится аналитическими расчетами. В случае несоблюдения заданных условий эксплуатации эти дебиты корректируются подбором величин, отвечающих всем требованиям.

10. Путем анализа условий разработки эксплуатационных и перспективных участков водозаборов выявляются общие эксплуатационные запасы месторождения, а также балансовые и забалансовые запасы.

Опыт оценки эксплуатационных запасов промышленных подземных вод для различных районов СССР показал, что такая оценка весьма трудоемка и сложна. Поэтому С. С. Бондаренко, Н. А. Плотниковым, С. В. Темко, Г. Ц. Тумаркиным была рассмотрена возможность использования ЭВМ в комплексных гидродинамических и технико-экономических расчетах. Такое исследование явилось общим для ряда вопросов организации и работы водозабора по добыче промышленных вод в любых по сложности гидрогеологических условиях. Результаты анализа математической модели эксплуатации водозаборов промышленных вод привели к необходимости решения задачи нелинейного программирования, что было выполнено кафедрами математики и гидрогеологии МГРИ для сравнительно простых гидрогеологических условий с целью выбора оптимального варианта разработки и подсчета эксплуатационных запасов. Задача региональной оценки эксплуатационных запасов промышленных вод принципиально может быть решена на ЭВМ с использованием имеющихся в настоящее время разработок. Более точное решение этой задачи, учитывающее неоднородность и взаимосвязь водоносных горизонтов, а также сложные граничные условия, может быть выполнено на цифро-аналоговых комплексах, совмещающих возможности аналогового моделирования и быстродействие ЭВМ. Это позволит расширить диапазон возможных вариантов размещения водозаборов и усло-

вий их эксплуатации практически до любых необходимых пределов.

В данной главе рассмотрены лишь основные принципы оценки эксплуатационных запасов месторождений подземных промышленных вод. Разнообразие гидрогеологических условий месторождений приводит к необходимости разработки в каждом случае оригинальных методических приемов региональной оценки эксплуатационных запасов этих вод. В ряде случаев, в частности при малом числе эксплуатационных участков водозаборов, такие приемы весьма просты. В пределах таких месторождений, как Тюменское, Волго-Камское, Западно-Туркменское, региональная оценка эксплуатационных запасов весьма трудоемка. Поиски наиболее короткого и правильного пути при этом приводят к весьма сложным аналитическим зависимостям и построениям с учетом разработанных и изложенных выше основных методических положений.

Минеральные подземные воды

С точки зрения региональной оценки ресурсов минеральных вод к платформенным и складчатым областям, вследствие существенно отличающихся гидрогеологических условий, надо подходить принципиально различно.

Платформенные области. В платформенных областях и крупных бассейнах складчатых областей водоносные горизонты, к которым приурочены минеральные воды, распространены регионально, имеют выдержанный пластовый характер залегания, относительно однородны по фильтрационным свойствам. Опираясь на накопленный в СССР опыт региональной оценки и картографирования эксплуатационных ресурсов в таких пластовых системах, для подсчета эксплуатационных ресурсов минеральных вод рекомендуется гидродинамический метод.

Основные типы минеральных вод в платформенных областях — это солевые и рассольные подземные воды, обладающие, как правило, достаточно большими напорами, особенно в центральных частях артезианских бассейнов. На бо́льшей части таких бассейнов основная часть эксплуатационных ресурсов формируется за счет сработки естественных (в том числе упругих) запасов. Некоторая часть может обеспечиваться перетеканием из смежных горизонтов. Только в краевых частях бассейнов в эксплуатационных ресурсах сравнительно неглубоко залегающих горизонтов могут существенную роль играть естественные ресурсы. Региональная оценка ресурсов гидродинамическим методом в целом аналогична методам оценки, применяющимся для других типов вод, хотя имеются некоторые различия. В отличие от промышленных и термальных при оценке минеральных вод практически невозможен геолого-экономический подход. Кроме того, при региональной оценке ресурсов минеральных вод следует учитывать следующие особенности их использования: требуемый большой (практический неограниченный) срок эксплуатации, небольшие дебиты от-

дельных водозаборных сооружений, жесткие требования к качеству воды и трудности прогноза его. Исходя из этих требований, для напорных минеральных вод следует учитывать из естественных только упругие запасы из-за нецелесообразности использования гравитационных запасов, т. е. осушения пласта. Привлекаемые ресурсы (перетекание из смежных горизонтов) оценить достоверно можно только по результатам эксплуатации крупных водозаборов, что для минеральных подземных вод нереально. Доля их в эксплуатационных ресурсах минеральных вод незначительна и может не учитываться.

Суть оценки заключается в определении производительности Q одного или группы водозаборов по формуле

$$Q = (4\pi kmS)/R_{\text{сум}}, \qquad (69)$$

где km — водопроводимость горизонта; S — заданное допустимое понижение уровня (в зависимости от типа водоподъемных средств и величины напора); $R_{\text{сум}}$ — суммарное гидравлическое сопротивление, учитывающее фильтрационное сопротивление скважины, внешние граничные (в плане и разрезе условия), взаимное размещение скважин в водозаборе.

Водозаборы в пределах площади распространения водоносного комплекса (горизонта) с определениым типом минеральных вод размещаются либо в зависимости от предполагаемых конкретных потребителей, либо по условной, чаще всего равномерной сетке.

Первый вариант применим в основном при оценке ресурсов минеральных вод, распространенных в пластовых условиях относительно ограниченно. В этом случае производится схематизация граничных условий оцениваемого комплекса в плане и разрезе и по известным формулам для пластов соответствующей конфигурации рассчитываются величины $R_{\text{сум}}$ в формуле, а затем Q. В большинстве случаев при региональной оценке возможна схематизация водоносных пластов как фильтрационно однородных с усредненными значениями параметров, с непроницаемыми кровлей и подошвой. Расчетные схемы, наиболее распространенные в практике, по характеру вертикальных границ: неограниченный пласт (все границы не оказывают существенного влияния — не более 10 % от величины понижения), полуограниченный пласт с одной непроницаемой границей (выклинивание водоносного горизонта, региональный водонепроницаемый разлом), реже с границей постоянного напора (для горизонтов, имеющих гидравлическую связь с поверхностными водотоками), в небольших бассейнах складчатых областях — замкнутый пласт с непроницаемым контуром.

Большинство продуктивных водоносных комплексов (горизонтов) в артезианских бассейнах платформенного типа имеет региональное распространение. Тогда оценку ресурсов минеральных вод целесообразнее выполнять при равномерной сетке размещения скважин по всей площади распространения продуктивного комп-

лекса (горизонта). Расчет расхода Q водозабора, размещаемого в центре замкнутого кругового пласта, когда он формируется только за счет сработки упругих запасов, выполняется по формуле Маскета:

$$Q = \frac{2\pi kmS}{(2kmt)/(\mu \cdot R_к^2) + \ln(R_к/r)0{,}8}, \qquad (70)$$

где μ — упругая водоотдача, r — раднус водозаборного сооружения, $R_к$ — радиус круга, эквивалентного по площади выделенному блоку пород; t — расчетный срок эксплуатации. При равномерной сетке размещения водозаборов удобнее сразу рассчитывать модули эксплуатационных ресурсов $M_э$ по формуле, получаемой с учетом площади блока:

$$M_э = \frac{Skm}{at + (R_к^2/2) \cdot \ln(R_к/r)}. \qquad (71)$$

Величина $R_к$ определяется через площадь блока F_1 ($R_к = \sqrt{F_1/\pi}$ или расстояние между скважинами l ($R_к = 0{,}565l$). При выборе шага сетки следует исходить из природных условий территории и возможных потребностей в минеральной воде, т. е. глубины залегания и мощности водоносного комплекса, наличия водозаборов, месторождений нефти, газа, промышленных и теплоэнергетических вод, рельефа местности, густоты населенных пунктов и типа минеральной воды. С учетом этих факторов шаг сетки может быть от 5 до 50 км, преимущественно 30—50 км. Радиус водозаборного сооружения условно принимается равным 10 м.

Значения полученного по формуле модуля эксплуатационных ресурсов распространяется на все участки территории с близкими величинами допустимых понижений, коэффициентов водопроводимости и пьезопроводности. Такие участки выделяются путем анализа карт фильтрационных параметров и динамики подземных вод.

Расчетный срок при оценке ресурсов минеральных вод обычно принимается равным $2 \cdot 10^4$ сут ($\approx$54 года). Величина допустимого понижения уровня не должна превышать высоты напора над кровлей напорного водоносного горизонта и половины мощности безнапорного, если при этом отсутствуют предпосылки для изменения качества воды. Максимальная величина его определяется исходя из допустимой глубины динамического уровня, т. е. технических средств для подъема воды, и условий сохранения качества минеральных вод. Именно это условие характерно для многопластовых систем с различным качеством воды в смежных горизонтах и наличием предпосылок их гидравлической взаимосвязи при изменении соотношения напоров в этих горизонтах. Для высоконапорных минеральных подземных вод некоторых типов в ряде случаев может оказаться целесообразным ограничение понижения условием самоизлива их на весь период эксплуатации.

Фильтрационные параметры водоносных комплексов (горизонтов) определяются следующим образом. В качестве наиболее до-

стоверных значений рассматриваются полученные по результатам прослеживания уровней и дебитов при опытных, опытно-эксплуатационных откачках и эксплуатации, причем для коэффициентов пьезопроводности и уровнепроводности — только по данным наблюдательных скважин. Однако большинство данных имеет меньшую достоверность, но при отсутствии другой информации должно максимально использоваться. Это сведения о дебите и понижении при разного рода откачках, исследовании разведочных скважин на нефть и газ. Значения, полученные менее надежными методами, отбраковываются в зависимости от возможной степени их достоверности, общего количества информации и соответствия данному типу пород. С этой целью можно использовать эмпирические графики корреляционной связи водопроводимости и удельного дебита скважин $km=f(q)$ для данной территории, отбрасывая значения, сильно отклоняющиеся от общей закономерности.

В тех случаях, когда опробованы (например, в нефтяных и газовых скважинах) небольшие интервалы от общей мощности водоносных комплексов, через km и m интервала определяется коэффициент фильтрации k, а суммарный коэффициент водопроводимости — как km, где m — полная мощность (эффективная) продуктивного комплекса. При больших значениях m следует учитывать возможное изменение коэффициента фильтрации с глубиной. эффективная мощность комплекса (горизонта) определяется по данным бурения, специальных исследований, а для глубоких скважин — в основном по данным геофизического каротажа.

Достоверные сведения о коэффициентах пьезопроводности (уровнепроводности) или о водоотдаче упругой (гравитационной), как правило, единичны, поэтому здесь во многих случаях следует прибегать к литературным данным, аналогии, с учетом характера пород и минерализации подземных вод. Ориентировочные значения водоотдачи μ следующие; для высоконапорных водоносных горизонтов 10^{-4}—10^{-5}; для горизонтов с напором 50—70 м—10^{-3}—10^{-4}; для безнапорных водоносных горизонтов: в мелкозернистых песках 0,1; в средне- и крупнозернистых песках 0,15; для трещиноватых карбонатных пород $(1{,}5—2)\cdot10^{-2}$, для трещиноватых терригенных пород $(1—1{,}5)\cdot10^{-2}$, для трещиноватых изверженных и эффузивных $(1—5)\cdot10^{-3}$. По этим данным коэффициент пьезопроводности и уровнепроводности определяется по формулам

$$a=(km)/\mu, \quad a=(kH)/\mu. \tag{72}$$

Горноскладчатые области. Для складчатых областей характерны крайне сложные гидрогеологические условия: трещинно-жильный, трещинный, пластово-трещинный тип коллекторов, их фильтрационная неоднородность, сложные пути движения, локализации и разгрузки подземных вод. Основными типами минеральных вод здесь являются углекислые самого разнообразного состава и азотные термальные слабоминерализованные воды, формирование которых связано с неотектонической активизацией, процессами ре-

гионального термометаморфизма, прошлого и современного магматизма. Для большого числа месторождений минеральных вод этих двух типов характерен инжекционный механизм образования, когда минеральные воды скапливаются в пластовых водонапорных системах (или бассейнах грунтовых вод) из-за разгрузки в них глубинных флюидов, поднимающихся по трещинно-жильным системам тектонических нарушений. Тем самым определяется зависимость ресурсов минеральных вод от геолого-структурных, тектонических факторов и степени неотектонической активизации района. В таких условиях применение традиционных методов региональной оценки ресурсов затруднительно. Методика оценки прогнозных ресурсов минеральных вод в горноскладчатых регионах с учетом их специфики впервые разработана во ВСЕГИНГЕО [6—7]. В связи с тем что влияние на величину ресурсов геолого-структурных особенностей, их неотектонической активизации, тектоно-метаморфического развития, как правило, не поддается прямому количественному учету, выбран комбинированный подход к решению этой задачи. При этом используются некоторые обобщенные характеристики, интегрально учитывающие основные факторы, определяющие величину ресурсов.

Прогнозная оценка ресурсов минеральных вод (углекислых и азотных термальных) ΣQ_e осуществляется через величину естественных ресурсов скрыторазгружающихся в наложенную впадину минеральных вод по зависимости:

$$\sum Q_e = l_н k_a b q, \qquad (73)$$

где $l_н$ — общая протяженность тектонических нарушений в данной структуре, м; b — средняя для региона эффективная мощность гидрогеологически активного тектонического нарушения, м; k_a — коэффициент гидрогеологической активности нарушения — отношение длины проницаемой части нарушения к его общей протяженности; q — удельный расход, т. е. расход разгружающихся через зону нарушения минеральных вод, отнесенный к единице площади тектонического нарушения.

Значения параметров, необходимых для оценки ΣQ_e, определяются с учетом геолого-тектонических и гидрогеологических особенностей районов и по возможности отдельных наложенных впадин.

Коэффициент гидрогеологической активности нарушения для районов устанавливается как среднее значение из коэффициентов, рассчитанных по отдельным гидроминеральным линиям. В ряде случаев величина его существенно изменяется в зависимости от возраста структур (например, от 0,01 в раннеальпийских до 0,11 — в позднеальпийских сооружениях на Малом Кавказе).

Мощности гидрогеологически активных тектонических нарушений определяются по геологическим данным с учетом мощности и преобладающего характера напряжений (сжимающих или растягивающих). Величину q можно рассчитать путем оценки вели-

чины естественных ресурсов минеральных вод по ряду изученных месторождений в соответствии с формулой

$$q = Q_e/(lb); \quad Q_e = Q_{пл}\theta, \tag{74}$$

где $Q_{пл}$ — расход воды в горизонте-реципиенте, в котором осуществляется восходящая разгрузка термоминеральных вод. По течению, ниже зоны разгрузки, он будет равен $Q_{пл} = klbH_{гр}$. Здесь

$$\theta = \left[\frac{1{,}13L \cdot H^2(1-H)}{I(L+0{,}06)(1+H^2)}\right] \cdot \frac{0{,}22}{\sqrt{I}}, \tag{75}$$

$L = l/H_{мин}$ — безразмерная протяженность гидрогеологически активной части зоны разгрузки; l — фактическая длина зоны разгрузки вдоль по потоку, м; b — ее ширина; $H_{мин}$ — средняя величина напора восходящих вод по отношению к подошве горизонта-реципиента; H — безразмерный напор, равный для грунтового водоносного горизонта $m/H_{мин}$, для напорного — $H_{гр}/H_{мин}$. В данном случае m мощность грунтового водоносного горизонта над зоной разгрузки восходящих вод, м; $H_{гр}$ — напор в напорном горизонте-реципиенте от его подошвы; I — средний гидравлический градиент в водоносном горизонте-реципиенте, рассчитанный для участка в пределах зоны разгрузки; k — коэффициент фильтрации пород горизонта-реципиента. Величина θ табулирована при некоторых значениях L и I.

Величина удельного расхода $q = Q_e/(l \cdot b)$, как выявлено, зависит от глубины вреза структур. Поэтому для того чтобы использовать значения q, полученные по отдельным месторождениям, для оценки ресурсов других наложенных впадин, необходимо определить зависимость $q = f(m)$, где m — глубина вреза, т. е. мощности для грунтового горизонта и напора — для напорного.

На основании кривых $q = f(m)$, полученных для каждого региона, путем их интерполяции или экстраполяции определяются значения q для конкретных впадин в зависимости от глубины их вреза.

Величина эксплуатационных ресурсов $Q_э$ в среднем определяется как 0,3 Q_e. Коэффициент 0,3 получен эмпирическим путем как средняя величина $Q_э/Q_e$ по ряду месторождений Кавказа и Дальнего Востока, где определялись как естественные, так и эксплуатационные ресурсы, и может быть уточнен для других регионов. Исходной операцией для региональной оценки ресурсов минеральных вод в складчатых областях является выделение региональных дренажных систем, а в их пределах — отдельных наложенных впадин.

Протяженность систем различных дислокаций оценивается следующими способами. В неглубоко заложенных структурах, системы разрывных дислокаций которых отражены на картах, производится замер их непосредственно по карте в пределах отдельных впадин. Для наложенных впадин с большими мощностями осадочных образований, разрывные дислокации которых не картировались, применяется следующий методический прием: замеряет-

ся протяженность разрывных дислокаций $l_н$ в горном обрамлении, площадь этого обрамления S и устанавливается модуль $l_н/S$, типичный для данного региона. Затем по площади самой наложенной впадины $S_{вп}$ вычисляется протяженность разрывных нарушений, скрытых под осадочным чехлом: $(l_п/S) \cdot S_{вп}$. Для территорий, где не выделяются наложенные впадины, а минеральные воды регистрируются в виде естественных источников, суммарная величина прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов может быть оценена по суммарному родниковому стоку. При этом следует дифференцировать его в зависимости от длительности и периода режимных наблюдений.

Теплоэнергетические подземные воды

Пластовые водонапорные системы. В соответствии с изложенными принципами региональная оценка запасов термальных вод пластовых систем заключается в последовательном решении комплекса гидрогеологических (гидродинамических, гидравлических), теплофизических и технико-экономических задач и выборе из числа рассматриваемых вариантов, отвечающих условиям рентабельного использования таких вод. Были разработаны соответствующая методика, основные положения которой рассмотрены в настоящем разделе, и комплекс программ для региональной оценки потенциальных эксплуатационных запасов термальных вод пластовых водонапорных систем и производительностей одиночных рентабельных водозаборов с использованием ЭЦВМ. Методика и программы предусматривают оценку запасов применительно к двум методам разработки водоносных комплексов (горизонтов): с поддержанием и без поддержания пластового давления (ППД) по двум способам эксплуатации скважин (фонтанному и насосному).

Методы решения гидрогеологических задач базируются на принципах, методах и опыте региональных оценок запасов пресных, термальных и промышленных вод.

Региональная оценка запасов термальных вод выполнялась на основе гидрогеологического и геотермического районирования оцениваемых территорий. В соответствии с этим были выделены гидрогеологические области, районы и подрайоны. Далее было выполнено специальное гидрогеотермическое районирование выделенных таксономических подразделений, направленное на установление характерных сочетаний основных гидрогеологических и геотермических параметров, определяющих в комплексе размеры эксплуатационных запасов и теплоэнергетический потенциал термальных вод, а также технико-экономические показатели их промышленного освоения. К числу таких параметров относятся: глубина залегания водоносного комплекса, пластовая температура (или величина геотермического градиента), коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности, положение статических уровней воды относительно поверхности Земли, минерализация и химический состав вод. В результате анализа характера изменения пе-

речисленных параметров были выделены гидрогеотермические зоны, для которых выполнялись все дальнейшие расчеты, позволяющие оценить запасы. В соответствии с расчетами осуществлялось геолого-экономическое районирование оцениваемого водоносного комплекса и были выделены четыре группы гидрогеотермических зон:

— зоны экономически эффективной фонтанной эксплуатации скважин при разработке горизонтов (комплексов) без ППД;

— зоны экономически эффективной насосной эксплуатации скважин при разработке без ППД;

— зоны экономически оправданного применения метода разработки водоносных комплексов с ППД;

— бесперспективные гидрогеотермические зоны.

Методика оценки потенциальных эксплуатационных запасов исходит из предпосылки об относительно равномерном размещении теплоэнергопотребителей в пределах оцениваемых территорий. Это оправдано на этапе предварительной оценки в силу следующих обстоятельств:

— отсутствия данных о размещении теплоэнергопотребителей и возможных масштабах потребления термальных вод (обусловлено отсутствием Генеральной схемы использования геотермальных ресурсов):

— больших расстояний (35—50 км) между условными водозаборами, оцененными на основе предварительного решения тестовых оптимизационных задач, что для большинства экономически освоенных районов сопоставимо с расстояниями между населенными пунктами — возможными потребителями термальных вод;

— нецелесообразности дальней магистральной транспортировки термальных вод.

Рассмотренное позволило использовать для решения гидрогеологической части задачи по оценке потенциальных запасов при разработке водоносных комплексов без ППД известный методический прием, основанный на введении условных непроницаемых границ. Потенциальные эксплуатационные запасы оценивались по формуле Маскета—Бочевера для скважины, помещенной в центре кругового замкнутого пласта, в которую вводились поправки на термолифт и гидравлические потери напора в скважине. Общая запись уравнений произведена по методике, которая позволяет определять производительность скважин, входящих в состав условных водозаборов как функцию глубины динамического уровня воды в скважинах (с учетом указанных поправок), а также просто оптимизировать на основе вариантных расчетов следующие показатели потенциальных запасов; расстояния между условными водозаборами (радиусы условных непроницаемых границ), приведенные радиусы водозаборов (как функцию количества скважин и расстояний между ними), глубины динамических уровней воды в скважинах. В результате расчетов для всех рассматриваемых вариантов определяются производительности условных водозаборов и отдельных скважин, а также модули эксплуатационных запа-

сов. Перечисленные показатели — производительность, модули рассчитываются в единицах тепла (с учетом теплопотерь в скважинах). При расчетах условного теплоэнергетического потенциала запасов термальных вод было принято единое значение конечной температуры $t_к$, после снятия тепла равное 30 °С.

Производительность одиночных оптимизированных водозаборов как показатель возможных первоочередных масштабов использования термальных вод определялась по вышеописанному способу, но только для схемы неограниченного в плане водоносного комплекса. Для замкнутых малых межгорных и предгорных впадин, где неучет влияния внешних границ ведет к существенным погрешностям, в целях оценки производительности одиночных водозаборов использовались результаты расчетов потенциальных запасов (выполненных по схеме кругового закрытого пласта).

Как показали результаты вычислений, для ряда перспективных районов потенциальные эксплуатационные запасы термальных вод оказались существенно заниженными и в некоторых случаях ниже выявленных запасов (особенно при фонтанной эксплуатации скважин). Это положение объясняется тем, что при реализации геолого-экономического подхода в пределах этих районов из числа перспективных (и соответственно из общей суммы потенциальных запасов) исключается значительное число гидрогеотермических зон (в различных случаях по различным причинам — низкие значения водопроводимости, пластовых температур, невысокие избыточные напоры).

При принятой схеме расчета (замкнутый круговой пласт) реально существующие в этих зонах запасы термальных вод не принимают никакого участия в формировании эксплуатационных запасов соседних и ближайших зон, в пределах которых эксплуатация термальных вод по результатам геолого-экономических оценок оказалась эффективной. Так как в действительности при упругом режиме фильтрации в формирование эксплуатационных запасов вовлекаются запасы весьма обширных площадей развития водоносного комплекса (горизонта), рассмотренное противоречие и привело к существенному занижению модулей и самих запасов.

При оценке потенциальных запасов по районам Предкавказья и Крыма (большое число зон с низкими значениями водопроводимости и избыточных напоров), а также Западной Сибири (низкие температуры воды, невысокие избыточные напоры) использовались результаты расчетов производительности одиночных водозаборов. Размещение этих водозаборов и определение их числа в пределах перспективных зон производилось с учетом условного радиуса влияния, определяемого по величине заданного понижения уровня на границе области влияния $S_{вл}$ по общеизвестной методике [34, 50].

С учетом сложности надежного прогнозирования процесса охлаждения водоносного комплекса в неоднородных коллекторах оценка потенциальных эксплуатационных запасов термальных вод применительно к разработке с ППД выполнена для условия по-

стоянства температуры добываемых вод в течение всего расчетного срока при ряде оправданных упрощающих допущений. К числу основных из них относятся равенство объемов добычи и закачки воды, относительная однородность оцениваемого комплекса (горизонта) в фильтрационном и теплофизическом отношениях, относительное совершенство ограничивающих водоупоров, игнорирование процессов загрязнения призабойной зоны нагнетательных скважин, а также физико-химических процессов в системе «пластовые термальные воды — водовмещающие породы — отработанные термальные воды».

В связи со сложностью оценки приемистости нагнетательных скважин принято также допущение о том, что число нагнетательных скважин в водозаборе в 2 раза больше, чем эксплуатационных, т. е. приемистость в 2 раза меньше производительности. Оценивались линейные трехрядные схемы водозаборов с внутренним размещением батарей нагнетательных скважин. Выбор такой схемы произведен с учетом необходимости локализации процессов охлаждения пласта и повышения эффекта ППД. Как показывает анализ гидродинамических процессов, при отмеченных допущениях принятых в скважинах водозаборных сооружений и реальных расстояниях между системами нагнетательных и эксплуатационных скважин в пласте. достаточно быстро наступает стационарный режим фильтрации. Поэтому для оценки основных гидрогеологических показателей по водозабору получены достаточно простые формулы установившегося движения. По этим формулам для заданных понижений и вариантов схем водозаборов, отличающихся расстояниями между рядами нагнетательных и эксплуатационных скважин, общей длиной водозабора, числом скважин, вычислялись основные технические показатели по водозабору: производительность скважин и водозабора, давление нагнетания на устьях нагнетательных скважин, скорость фильтрации воды, в пласте, расход электроэнергии на закачку воды. Следующим этапом расчета являлось решение задачи по оценке степени охлаждения пласта для каждой из рассматриваемых схем водозабора на основе расчетной схемы Ловерье. Далее производился отбор вариантов, удовлетворяющих заданному условию постоянства температуры добываемых вод в течение всего расчетного срока (30 лет). Эти варианты подвергались последующей технико-экономической оценке, по результатам которой выбирался оптимальный вариант. Для оптимального варианта конструкции водозабора определяются основные технико-экономические показатели, включая затраты на закачку воды, себестоимость добычи 1 м^3 воды, приведенные затраты на 1 ГДж получаемого тепла, показатель экономического выигрыша.

Потенциальные запасы по этим результатам подсчитывались путем вычисления модуля запасов по воде и теплу с последующим его умножением на площадь оцениваемой гидрогеотермической зоны. При определении модулей площадь водозабора принималась с учетом резервных предохранительных зон, шириной в

1 км. Аналогичным образом (через модульные показатели) оценивалась на основе показателя экономического выигрыша и сумма годового экономического эффекта от использования гидротермальных ресурсов.

Трещинные водонапорные системы

Региональная оценка прогнозных запасов естественных теплоносителей (термальных вод, парогидротерм) в трещинных водонапорных системах является весьма сложной задачей и по сравнению с таковой для пластовых систем отличается рядом специфических особенностей, обусловленных характером движения, локализации и разгрузки гидротерм в горноскладчатых регионах. Циркуляция термальных вод в таких системах осуществляется, как правило, в сложных условиях тектонических нарушений, гидрогеологическая роль которых может быть определена лишь качественно, а источники формирования эксплуатационных запасов не могут быть однозначно установлены и количественно оценены. Распространение и разгрузка термальных вод и парогидротерм имеют в основном локальный характер, и месторождения трещинных систем относятся к группе трещинно-жильных. Фильтрационные и тепловые поля в трещинных водонапорных системах характеризуются чрезвычайной неоднородностью.

В силу указанных обстоятельств применение гидродинамического метода для региональной оценки прогнозных эксплуатационных запасов термальных вод в рассматриваемых условиях в настоящее время практически невозможно, и даже детальная разведка отдельных участков не обеспечивает получение всех параметров, необходимых для оценки запасов гидродинамическим методом. Поэтому оценка прогнозных эксплуатационных запасов термальных вод трещинных систем базируется в основном на методах гидрогеологической аналогии, которые могут быть применены практически в любых гидрогеологических условиях при наличии эталонного разведанного участка. При этом в связи с локальным (очаговым) характером распространения и разгрузки термальных вод и парогидротерм в трещинных водонапорных системах оценка прогнозных запасов термальных вод производится, как правило, по отдельным геотермальным объектам, входящим в регион, с последующим суммированием этих запасов. Следует отметить, что методика региональной оценки прогнозных запасов термальных и минеральных вод лечебного назначения, выполняемая в совокупности для целого района (геологической структуры), практически неприемлема для региональной оценки геотермальных ресурсов теплоэнергетического назначения, так как позволяет оценить лишь водную составляющую этих ресурсов, но не их тепловой потенциал.

Как показал опыт разведки советских и зарубежных исследований геотермальных месторождений рассматриваемых водонапорных систем, при их разбуривании и эксплуатации суммарный

тепло- и водоотбор значительно превышает естественную тепловую и водную разгрузку гидротерм, существовавшую до проведения разведочных работ. Анализ данных более 50 разведанных месторождений показал, что при разбуривании расходы увеличиваются по сравнению с естественной разгрузкой в 3—30 раз и более, одновременно повышается и температура воды, выводимой скважинами, по сравнению с температурой в естественных выходах. Исходя из этого можно сделать вывод, что прогнозная оценка гидротермальных ресурсов включает не только определение водной составляющей этих ресурсов, но и прогноз температуры теплоносителя на глубине. Такой подход был впервые предложен Е. В. Вакиным и реализован Ю. Ф. Манухиным для оценки геотермальных ресурсов Камчатки.

Прогноз температуры теплоносителя на глубине достаточно сложен и основан на методике гидрохимического геотермометра. Суть метода заключается в том, что по наблюдаемой на поверхности концентрации различных компонентов в термальных водах определяется температура равновесного раствора в глубинах гидротермальных систем. Прогноз основан на допущении химического равновесия водного раствора по всей области фильтрации термального потока от очага разгрузки до той глубины, где это равновесие формируется. В отечественной и зарубежной практике наибольшее применение получили два основных гидрохимических геотермометра — силикатный и натрий-калий-кальциевый. Несмотря на ряд допущений и условностей в методике, принципиальная возможность использования гидрохимических геотермометров может быть обоснована сравнительно удовлетворительной сходимостью расчетных температур с фактическими, установленными при разбуривании гидротермальных систем (Камчатка, СССР; США, Новая Зеландия, Исландия и др.).

С помощью указанных методов Ю. Ф. Манухин и Л. А. Ворожейкина рассчитали так называемые «базовые» температуры (или температуры зон силикатного T_{Si} и натрий-калий-кальциевого $T_{Na\text{-}K\text{-}Ca}$ равновесия) для тех месторождений и термопроявлений Камчатки, по которым имелись соответствующие химические анализы. Статистическая обработка зависимости между температурой зоны силикатного (натрий-калий-кальциевого) равновесия и фактическими температурами в скважинах одного из месторождений позволила названным авторам рассчитать переходные коэффициенты между этими параметрами.

Для силикатного геотермометра был получен переходный коэффициент 0,7 на глубинах до 600 м и 0,8 — более 600 м. Таким образом, прогнозные температуры на глубинах возможного освоения геотермальных объектов оценивались по формуле $T_{пр}=T_{Si}S$, где $T_{пр}$ — прогнозная температура на глубине возможного освоения объекта, °С; T_{Si} — температура зоны силикатного равновесия («базовая») температура, °С; S — понижающий коэффициент (0,7—0,8).

Рассмотренная методика позволяет лишь приближенно оценить температурные условия в недрах гидротермальных систем при их разбуривании и требует дальнейшего совершенствования.

Прогнозная оценка водных ресурсов трещинных гидротермальных систем осуществляется на базе методов гидрогеологической аналогии. Возможность использования этого метода определяется в первую очередь наличием детально разведанного участка-аналога, где уже оценены эксплуатационные запасы подземных вод. Слабая изученность большинства гидротермальных систем трещинного типа не позволяет проводить достаточно обоснованные аналогии и поэтому наиболее доступным и практически приемлемым для широкого применения оказался лишь один из аналоговых методов — метод эмпирических коэффициентов. Эмпирические коэффициенты показывают возможность увеличения запасов при разбуривании объекта по сравнению с дебитом естественной разгрузки гидротерм. Они рассчитываются по изученным объектам как отношение величины разведанных эксплуатационных запасов месторождений к дебиту естественной разгрузки гидротерм (видимой или скрытой) на этом же месторождении. Значения эмпирических коэффициентов для одного и того же месторождения будут, естественно, различны при сравнении разведанных эксплуатационных запасов месторождения с разными видами разгрузки — с дебитом только видимой разгрузки или с суммарным дебитом, учитывающим также и скрытую разгрузку (если такая имеется). В первом случае величина коэффициента будет выше, чем во втором.

Рассмотренный метод, хотя и обладает в целом сравнительно низким уровнем достоверности, все же позволяет, пользуясь некоторыми усредненными коэффициентами, приближенно оценить ресурсы систем трещинного типа. Для оценки прогнозных запасов термальных вод Камчатки Ю. Ф. Манухин выбрал в качестве эталонных два наиболее изученных и разведанных месторождения: Больше-Банное и Паужетское. Эмпирические коэффициенты по первому составили 6,9 (по дебиту видимой разгрузки) и 4 (по дебиту суммарной разгрузки с учетом скрытой), по второму — 6,6 и 2,3, соответственно. Эти коэффициенты и были приняты при оценке запасов: два первых — для гидротермальных систем с инфильтрационным питанием типа Больше-Банной, последние — для систем с так называемым мобилизационно-инфильтрационным типом водного питания, т. е. с участием глубинных вод, как на Паужетском месторождении. Оценке запасов предшествовала типизация гидротермальных объектов по условиям водного питания.

Рассчитанные по указанной методике запасы были приняты в качестве прогнозных запасов термальных вод для складчатой гидрогеологической области Камчатки. Для всех остальных горно-складчатых регионов коэффициент увеличения расхода при разбуривании принимался равным 2—3 в зависимости от характера очага разгрузки и других сопутствующих признаков разгрузки термальных вод. Принятый коэффициент является минимальным

из действительно получаемых на практике при проведении разведочных работ.

Прогнозные эксплуатационные ресурсы тепла геотермального объекта рассчитывались как произведение прогнозных ресурсов термальных вод на прогнозную температуру теплоносителя на глубине, за вычетом конечной температуры использования теплоносителя. Для термальных вод она принималась равной 30 °С, так же, как и в пластовых системах; для парогидротерм, используемых в качестве энергетического сырья, конечная температура согласно рекомендациям Энергетического института им. Г. М. Кржижановского (ЭНИН) принималась 60 °С.

Прогнозная мощность геоТЭС для парогидротермальных месторождений, где теплоноситель представлен на глубине в основном жидкой фазой, рассчитывалась по формуле

$$N_{\text{уст. эл}} = 10^{-3} \cdot G \cdot \eta\,(\sigma/\varepsilon), \qquad (76)$$

где $N_{\text{уст.эл}}$ — установленная электрическая мощность геоТЭС, МВт; G — прогнозные эксплуатационные ресурсы тепла геотермального объекта, кДж/с; $\eta\,(\sigma/\varepsilon)$ — термодинамический коэффициент брутто геоТЭС (учитывающий к.п.д. геоТЭС).

По данным ЭНИН, коэффициент $\eta\,(\sigma/\varepsilon)$ зависит от температуры теплоносителя на глубине и равен при температуре 250° — 0,15; 200° — 0,13; 165° — 0,09. Для тех парогидротермальных месторождений, в которых теплоноситель представлен на глубине преимущественно паровой фазой — сухим насыщенным или перегретым паром (по Д. Уайту — «системы с преобладанием пара»), пока не существует иных способов оценки их тепловой мощности или геотермальных ресурсов, кроме метода эмпирических коэффициентов. При этом исходным параметром является естественная тепловая разгрузка, которая для оценки запасов умножается на коэффициент увеличения ее при разбуривании. Значения эмпирических коэффициентов выбираются, как было показано выше, по аналогии с уже разведанными системами. Для Камчатки они колеблются от 3 до 7.

К «системам с преобладанием пара» относятся предположительно пять месторождений Камчатки, включенных в оценку, запасов: Камбальное, Верхне- и Нижне-Кошелевское, Семячикское и Мутновско-Жировское. Для последнего «система с преобладанием пара» характерна только для Мутновской части месторождения. Оценивая прогнозную мощность геоТЭС на таких месторождениях, В. М. Сугробов принял коэффициент $\eta\,(\sigma/\varepsilon) = 0{,}3$ по аналогии с геотермальными станциями Лардарелло (Италия) и Гейзеры (США).

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ КОЛЛЕКТОРОВ НА ОЦЕНКУ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГЛУБОКИХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТАХ

Впервые понятие о коллекторах или породах-коллекторах широко стало использоваться в нефтяной геологии. В общем смысле

под коллекторами понимаются горные породы, обеспечивающие фильтрацию флюидов в пласте и притоки их к забоям скважин. Четкую грань между коллектором и неколлектором на практике провести трудно, так как некоторые породы-неколлекторы при искусственном воздействии на них могут стать породами-коллекторами. Под коллекторами в утилитарном смысле принято понимать любые горные породы (осадочные, метаморфические и изверженные), способные образовывать промышленные скопления нефти, газа и подземных вод. Последнее возможно при выполнении как минимум двух необходимых условий: породы должны обладать определенной емкостью и проницаемостью. Емкость пород-коллекторов определяет величину геологических запасов нефти, газа или подземных вод, а проницаемость следует рассматривать как наиболее важный параметр, определяющий наряду с другими возможности промышленного использования геологических запасов, в частности, для подземных вод величину эксплуатационных запасов.

Рассмотрим породы-коллекторы в утилитарном пониманий, т. е. коллекторы, обеспечивающие промышленные притоки подземных вод. Будут рассматриваться породы-коллекторы только осадочного происхождения. Осадочные породы, как известно, принято подразделять на терригенные, хемогенные и органогенные отложения. В обломочных терригенных осадках коллектора нефти, газа и подземных вод могут быть представлены песками, песчаниками и алевролитами; в хемогенных — доломитами, некоторыми типами известняков и редко — ангидритами; в органогенных — известняками органогенного происхождения (рифтовые массы). Как правило, осадочные породы не затронуты процессами метаморфизма на всю мощность осадочного чехла седиментационных бассейнов. В то же время для них характерна интенсивная эпигенетическая проработка, приводящая к резким изменениям емкости и проницаемости коллекторов.

В однородных коллекторах порового типа обычно имеет место фильтрация практически по всему пустотному пространству (пористой среде) или при переходе к водоносному горизонту (пласту) по всей эффективной мощности пласта. Поэтому коллекторы порового типа можно представить как пористую среду, состоящую из непроницаемых зерен минерального скелета и пустот между ними. Во всех остальных типах коллекторов фильтрация жидкости осуществляется в основном по трещинам, крупным порам и кавернам. В связи с этим пористая среда таких коллекторов имеет более сложное строение и включает систему фильтрующих (проводящих) трещин, каверн и крупных пустот, с одной стороны, и малопроницаемых или непроницаемых блоков плотной породы, получивших название матрицы. Помимо типа пустотности значительное влияние на фильтрационные свойства коллекторов, сложенных терригенными породами, оказывают тип цемента, наличие линз или пластов глин, аргиллитов и пр. Природные коллектора представляют собой сложную механическую систему, нахо-

дящуюся в процессе геологической истории под воздействием большого числа факторов и претерпевающую неоднократно изменения. Многочисленность факторов, воздействующих на горные породы в глубоких частях седиментационных бассейнов, и недостаточная изученность реакции пород на действие этих факторов пока не позволяют создать стройную гипотезу прогнозирования коллекторов на сравнительно небольших глубинах (1500—3000 м). На больших глубинах изменения горных пород еще более существенны и соответственно усложняются вопросы прогнозирования и выявления коллекторов. Много неясного остается в проведении коллекторов на больших глубинах при воздействии на них не только природных факторов, но и при приложении сил, связанных с изменениями пластовых давлений в процессе отбора или закачки жидкостей (газов)в продуктивные пласты. Наиболее очевидной реакцией коллекторов на воздействие приложения внешних сил является их деформация. Обнаружение явления деформации коллекторов и заключенных в них жидкостей и газов послужило толчком к созданию теории упругого режима фильтрации, на которой базируются современные методы оценки эксплуатационных запасов в напорных пластах.

В процессе экспериментального изучения горных пород и пористых материалов (бетонов, железобетонов и т. п.) было установлено, что строгая пропорциональность между деформацией и напряжением в соответствии с законом Гука сохраняется в весьма ограниченном диапазоне изменения внешних сил и соответственно внутренних напряжений, когда они по величине даже не приближаются к пределу упругости или прочности. Было также установлено, что деформации протекают во времени и релаксация напряжений происходит не мгновенно. Всем горным породам, а в особенности глинистым разностям, присущи так называемые реологические свойства и поэтому при описании деформаций почти всегда необходимо учитывать фактор времени. Для эмпирического объяснения отклонений процесса деформации от закона Гука и учета фактора времени были введены такие понятия, как упругое последействие, упругая задержка и ползучесть. Упругое последействие и упругая задержка — явления, связанные с постепенным исчезновением деформаций после снятия нагрузки или увеличением напряжений при постоянной нагрузке. Для описания этих явлений предложено несколько экспоненциальных зависимостей, но они не прошли достаточной экспериментальной проверки на горных породах и возможности их использования на практике недостаточно ясны. Ползучесть — явление, связанное с необратимыми деформациями тел. Это явление может иметь место как при напряжениях, не превышающих предел упругости, так и при превышении предела прочности (упругости). Предполагается, что в первом случае при продолжительном действии внешней нагрузки происходят необратимые перестройки в минеральном скелете или даже в кристаллической решетке минералов, во втором — происходит частное нарушение прочности в минеральном скелете и пол-

зучесть принимает затухающий или незатухающий характер и протекает до момента разрушения или перехода в новое устойчивое состояние.

Имеются экспериментальные данные, позволяющие говорить о том, что при всестороннем равномерном сжатии явления ползучести и релаксации не наблюдается, но не исключено, что этот факт связан не с отсутствием явления, а техническими возможностями экспериментов и невозможностью моделирования на малых образцах проявления ползучести.

За пределами упругости или прочности деформации сплошных сред являются наиболее сложными, и ползучесть следует рассматривать как один из частных случаев таких деформаций. В общем случае деформации на пределе и за пределами упругости представляют сложное сочетание упругих, вязких и пластичных деформаций. Для качественного описания такого типа деформаций предложено несколько физических моделей: Сен-Венана, Максвелла, Бингама и др. Однако возможности этих моделей для описания реального поведения горных пород при приложении внешних сил и возникновении напряжений в скелете пород невелики. В связи с этим широко используются также феноменологические модели, подбираемые по результатам экспериментов.

Для горных пород на больших глубинах предел прочности, по видимому, может быть превзойден в редких случаях и может иметь место в глинистых образованиях и солях в призабойной зоне скважин (точнее, на стенке скважины), а при больших депрессиях охватывать сравнительно большие объемы пластов-коллекторов вокруг скважин.

Особенности физических деформаций природных коллекторов в глубоких частях артезианских бассейнов

Природные коллекторы в глубоких частях артезианских бассейнов находятся под воздействием двух основных внешних сил — горного (геостатического) и пластового давлений. Горное (геостатическое) давление действует вертикально в плоскости горизонтально залегающего пласта и вызываемое им среднее нормальное напряжение $\sigma_г$ в общем случае определяется из выражения:

$$\sigma_г = \frac{1}{3}\left(1 + 2\frac{\nu}{1-\nu}\right) g h \rho, \qquad (77)$$

где h — глубина залегания пласта, м; g — ускорение силы тяжести; м/см^2; ρ — средняя плотность пород, 10^3 кг/м^3; $\nu/1 - \nu$ — коэффициент бокового распора, изменяющийся в пределах от 0 до 1 (ν изменяется от 0 до 0,5).

Предполагается, что в естественном залегании пород в районах со спокойным тектоническим режимом за геологическое время происходит полная релаксация касательных напряжений и

главные нормальные напряжения равны между собой, и тогда выражение (77) принимает вид

$$\sigma_г = \sigma_{ср} = \sum_1^n g h_i \rho_i. \qquad (78)$$

где n — количество пластов над кровлей коллектора.

Однако имеется ряд факторов, показывающих, что условие равенства главных нормальных напряжений является скорее исключением и выполняется в полностью консолидированных породах с закрытыми порами и трещинами. Наличие открытых вертикальных трещин в малопроницаемых породах, обеспечивающих перетоки, а иногда и разгрузку подземных вод с больших глубин, свидетельствует о неравенстве вертикальных и горизонтальных $\sigma_б$ напряжений, причем обычно справедливо соотношение $\sigma_г > \sigma_б$. Выполнение последнего соотношения подтверждается также многочисленными данными по гидроразрывам пластов, при которых образуются в основном вертикальные трещины при давлениях, меньших $\sigma_г$ по выражению (78). В случае искусственного образования горизонтальных трещин давление гидроразрыва стремится к величине $\sigma_г$. В силу изложенных причин приравнивание главных нормальных напряжений σ_1, σ_2, σ_3 к величине $\sigma_г$ следует рассматривать как условный прием.

Пластовое давление P представляет внешнюю силу, обусловленную действием давления поровой жидкости на зерна непроницаемого минерального скелета коллектора и породы водоупоров. Физическая и математическая стороны формирования пластовых давлений, а также взаимодействия главных нормальных напряжений, включая $\sigma_г$ и напряжение, создаваемое пластовым (поровым) давлением, до настоящего времени остаются не совсем ясными. По существующим представлениям принято считать, что давление поровой жидкости «обжимает» зерна, слагающие минеральный скелет, и оказывает взвешивающее воздействие на кровлю, и следовательно, всю вышележащую толщу пород. Поэтому давление поровой жидкости получило название нейтрального напряжения.

В соответствии с изложенным напряжение, вызывающее деформацию коллектора, называется эффективным напряжением и определяется из выражения

$$\sigma_{эф} = \sigma_г - aP, \qquad (79)$$

где a — коэффициент разгрузки, или «взвешивания».

Физический смысл коэффициента a трактуется по-разному. Теоретическое численное значение его может изменяться от 0 до 1. По экспериментальным данным наиболее вероятное значение коэффициента a составляет около 0,85. Как следует из выражения (79), эффективное напряжение может изменяться за счет двух величин: $\sigma_г$ и P. Значения вертикального напряжения $\sigma_г$, по-видимому, изменяются только за геологическое время. При разработке

месторождений подземных промышленных вод величина $\sigma_г$ остается практически постоянной.

Величины пластового давления при эксплуатации месторождений могут изменяться в широких пределах — от десятых долей до десятков единиц мегапаскалей; соответственно, практически на такую же величину изменяются эффективные напряжения $\sigma_{эф}$. Поэтому возникающие в коллекторах деформации можно относить к разности $\sigma_г — P$, самому поровому (пластовому) давлению P или депрессии пластового давления ΔP.

Природные коллекторы в глубоких частях артезианских бассейнов при естественном залегании находятся в состоянии неустойчивого (динамического) равновесия и в рамках коротких отрезков времени, соизмеримых с временем эксплуатации месторождений, не испытывают заметных деформаций. Правда, в тектонически активных районах могут происходить и естественные деформации коллекторов за счет мощной разгрузки пластовых вод (Западно-Туркменский артезианский бассейн и др.). При разработке месторождений подземных промышленных или термальных вод, равным образом как и залежей нефти и газа, пласты-коллекторы (водоносные комплексы, горизонты) в небольшом диапазоне изменения пластовых давлений подвергаются в основном объемным упругим деформациям сжатия, а заключенная в них жидкость испытывает упругие деформации расширения.

Наиболее важной характеристикой коллекторов является обобщенный параметр, учитывающий деформации пород и насыщающих их жидкостей. В литературе такой обобщенный параметр получил название коэффициента упругоемкости пласта.

После установления факта, что перераспределение пластовых давлений в глубоких водоносных и нефтегазоносных пластах-коллекторах носит неустановившийся характер и связано с упругими деформациями пористой среды и заключенной в ней жидкости, в нашей стране и за рубежом выполнен огромный объем экспериментальных исследований по определению упругих характеристик различных горных пород и пластовых (или искусственных) жидкостей. Все определения для горных пород выполнялись примерно при одинаковых условиях эксперимента: эффективное напряжение в образцах пород изменялось в широких пределах либо за счет давления гидрообжима, имитирующего горное давление $\sigma_г$, равенстве $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ при постоянном поровом давлении, в частности, атмосферном давлении, либо за счет пластового давления P при постоянном давлении гидрообжима. Напомним, что для неглубоких водоносных горизонтов и водоупоров эксперименты проводятся в основном при одноосном сжатии (компрессионные испытания).

В процессе экспериментов определялись коэффициенты объемной сжимаемости среды $\beta_с$ или пор $\beta_п$. В ряде экспериментов одновременно на образце керна определялись коэффициенты проницаемости при различных давлениях гидрообжима. При одина-

ковых способах определения коэффициентов объемной сжимаемости для однотипных пород получены сопоставимые значения коэффициентов β_c и $\beta_п$ и, по всей вероятности, можно считать, что экспериментальные результаты исследований керна достаточно надежно характеризуют упругие свойства этих образцов горных пород (коллекторов и неколлекторов) на больших глубинах.

Анализ экспериментальных данных по определению характеристик горных пород на образцах керна позволяет говорить о том, что: 1) в зависимости от способа изменения эффективного напряжения в образце можно получить разные значения коэффициентов сжимаемости среды; бóльшие значения коэффициента сжимаемости получаются при изменении давления гидрообжима, а не порового (пластового); 2) численные значения коэффициентов сжимаемости уменьшаются с увеличением эффективного напряжения (давления) и связь между давлением и упругими параметрами пористой среды имеет нелинейный характер.

Экспериментальные определения упругих параметров горных пород сыграли исключительно большую роль в развитии теории линейной упругой фильтрации в напорных пластах и решении практических задач по разработке месторождений газа, нефти и подземных вод.

Как уже отмечалось, линейные упругие деформации являются частным случаев деформаций горных пород при изменении эффективного напряжения. В связи с этим прогнозы реальных деформаций массивов горных пород на бóльших глубинах, базирующиеся на теории линейных упругих деформаций и упругих параметрах пористой среды (под пористой средой понимается коллектор любого типа), получаемых при исследованиях образцов керна, следует рассматривать как приближенные. Причин такой приближенности несколько. Прежде всего следует указать на ограниченные возможности определения упругих параметров (коэффициентов сжимаемости) реальных пористых сред (особенно для коллекторов трещинного типа) в лабораторных условиях. Так, например, невозможно однозначно решить вопрос о наличии или отсутствии необратимых деформаций, поскольку фиксируемые при опытах необратимые изменения образцов могут объясняться разуплотнением керна при выбуривании и подъеме его на поверхности с непрерывным снижением давления от забойного до атмосферного. Технически невозможно имитировать большую продолжительность действия эффективных напряжений и неодинаковые величины главных нормальных напряжений в разных направлениях, в частности случай $\sigma_г > \sigma_б$. Следовательно, экспериментальным путем нельзя установить возникновение такого явления, как ползучесть и других реологических свойств горных пород.

При переходе к макрообъемам реальных водоносных комплексов (массивам горных пород) закономерности их деформации под влиянием изменения напряжения должны еще более усложняться: возникает необходимость дополнительного учета деформаций пластов и линз малопроницаемых пород (глины, аргиллиты, але-

вролиты и др.), пород кровли и подошвы, изменчивости упругих и реологических свойств во времени и т. д.

Решить некоторые из этих вопросов можно путем усовершенствования аппаратуры для проведения экспериментов, но наиболее реальными средствами являются постановка натурных режимных наблюдений на разрабатываемых месторождениях подземных вод в глубоких водоносных горизонтах или проведение специальных экспериментов на природных объектах.

Для коллекторов на больших глубинах наиболее сложен вопрос об изменении деформационных свойств пористой среды коллекторов и малопроницаемых пород при длительном воздействии напряжений под влиянием снижения пластовых давлений и, в основном, возможности возникновения неупругих (необратимых или остаточных) деформаций. Явление неупругих деформаций глубоко залегающих пластов-коллекторов изучено пока очень слабо и, по существу, даже наличие или отсутствие этого явления еще не доказано.

В литературе приводится наиболее типичный пример значительных необратимых деформаций природных коллекторов на больших глубинах: разработка нефтяных месторождений в верхнемеловых известняках в Чечено-Ингушской АССР (Карабулак-Ачалуки, Малгобек-Вознесенское, Заманкульское и др.), в процессе эксплуатации которых создавались значительные депрессии пластовых давлений до 10—25 МПа. Для доказательства проявления необратимых деформаций коллекторов использован традиционный в нефтепромысловой практике метод установившихся отборов (индикаторных кривых) при прямом и обратном ходе, принципиально не позволяющий установить характер деформаций пласта в удалении от эксплуатационных скважин. Смещение индикаторных кривых вниз по оси депрессий, зафиксированное по некоторым скважинам, скорее всего может происходить из-за уменьшения проницаемости в призабойной зоне за счет разрушения жестких контактов в трещинах в связи с превышением предела прочности и проявлением инерционных сил под влиянием больших скоростей потока жидкости в прискважинной зоне. Не совсем корректной была и техника проведения экспериментов. Поэтому некоторые исследователи, изучающие те же объекты, не признают наличие необратимых или остаточных деформаций.

По всей вероятности, упомянутый методический подход к исследованию необратимых деформаций не даст необходимых результатов и в лучшем случае позволяет обнаружить «разрушение» призабойной зоны и резкое снижение проницаемости в ней.

С целью выявления изменений деформационных свойств пород и возникновения необратимых деформаций должно выполняться два непременных условия: длительность воздействия напряжений и проведение наблюдений за изменением пластовых давлений не только в эксплуатационных скважинах, но и в удалении от них. Такие условия могут создаваться при длительной разработке ме-

сторождений в глубоких водоносных горизонтах и при наличии сети наблюдательных скважин. Следует отметить, что для получения полной картины перераспределения напряжений под влиянием работы водозабора недостаточно фиксировать изменения пластовых давлений в самом коллекторе (водоносном горизонте), необходимо иметь еще и сведения о перераспределении напряжений по относительно водоупорным породам как внутри водоносных комплексов, так и по породам, примыкающим к кровле и подошве. Все это технически можно осуществлять путем установки датчиков порового давления, надежные конструкции которых пока еще не разработаны.

В некоторых геолого-гидрогеологических условиях изменение деформационных свойств коллекторов под влиянием отбора жидкости удается зафиксировать с помощью сравнительно кратковременных опытов. Такими благоприятными условиями для проведения полевых экспериментов с целью выявления закономерностей изменения деформационных свойств пород с ростом эффективных напряжений во времени обладают гидравлически изолированные пласты-коллекторы ограниченных размеров (общий объем жидкости должен составлять не менее 10^6—10^7 м^3). В этих пластах под влиянием сравнительно небольших отборов жидкости можно вызвать значительную сработку пластовых давлений и создать большие напряжения $\sigma_{эф}$. Гидравлически изолированные пласты-коллекторы в карбонатных породах были выявлены при изучении мощных соленосных толщ в Ангаро-Ленском, Волго-Камском, Аму-Дарьинском, Припятском и других артезианских бассейнах. Корректность экспериментов в рассматриваемых условиях обеспечивается следующими обстоятельствами. Каменные соли, окружающие карбонатный пласт-коллектор, не имеют пористости и не заключают в себе свободной (подвижной) воды. Пористость матрицы коллектора незначительна, микропоры изолированного типа заключают только связанную воду. Фильтрующая среда представлена трещинами различной раскрытости и вторичными пустотами.

Одним из авторов были проведены полевые эксперименты на пластах-коллекторах внутри верхнепермской соленосной толщи в юго-восточной части Русской платформы. Эксперименты проводились путем последовательного увеличения напряжений в скелете коллектора за счет отбора жидкости в нарастающих количествах и сработки начального пластового давления, характеризующегося аномальными значениями. При отборах первых объемов жидкости деформации коллектора были упругими. После прекращения отбора жидкости пластовые давления во всех скважинах быстро восстанавливались, пьезометрическая поверхность занимала строго горизонтальное положение, но располагалась ниже предшествующей отметки. Следовательно, в закрытом пласте-коллекторе происходила сработка упругого запаса, что хорошо согласуется с теорией упругого режима и деформации скелета коллектора были линейными упругими.

Однако при достижении некоторой величины напряжений, значения которой для разных пластов-коллекторов, изученных в процессе полевых экспериментов, колебались в широких пределах, характер деформаций коллектора резко изменялся: в процессе отбора жидкости за счет нарастания эффективных напряжений и величины деформаций со временем происходит замедление темпа падения порового (пластового) давления, фиксируемого по наблюдательным скважинам примерно по такой же закономерности, как в бесконечном пласте $\Delta P = C \cdot \lg t$, где C — угловой коэффициент, т. е. депрессия пластового давления в наблюдательных скважинах линейно зависит от логарифма времени, а не от времени, как это должно было бы быть в замкнутом упругом пласте, что и наблюдалось на первых этапах экспериментов. При прекращении отбора жидкости пластовые давления во всех скважинах быстро выравниваются, пьезометрическая поверхность занимает горизонтальное положение, но во времени не остается стационарной, что имело место при упругом законе деформации. Рост давления после его выравнивания во всех точках пласта подчиняется следующей закономерности: $\sqrt{\Delta P} = C \cdot \lg t$.

Таким образом, на примере гидравлически изолированных пластов-коллекторов внутри соленосных толщ объективно показано изменение деформационных свойств коллектора с ростом эффективных напряжений в его скелете и переход обычных упругих деформаций в необратимые, имеющие характер ползучести, не затухающей во времени. Однако закономерность деформаций в рассматриваемом случае несколько отличается от типичной ползучести, так как хотя внешнее давление (геостатическая нагрузка) и оставалось в экспериментах постоянным, эффективное напряжение изменялось во времени — нарастало при отборе жидкости и уменьшалось при восстановлении пластового давления после прекращения отбора. Итак, под влиянием необратимых деформаций упругая отдача изолированного пласта, которую в данном случае более правильно называть условной упругой отдачей, существенно возрастает. Интересно отметить, что заметного изменения производительности скважин не наблюдалось даже при аварийных выпусках через обсадную колонну с депрессией на устьях до 9 МПа. Следовательно, разрушения призабойной зоны в данном случае скорее всего не происходило. Возникновение необратимых деформаций с проявлением ползучести следует предполагать в замкнутых пластах-коллекторах внутри мощных глинистых толщ (например, пласты-коллекторы в майкопской толще на Северном Кавказе, в турон-сеноманских отложениях Афгано-Таджикской впадины и др.). Безусловно, для глинистых толщ будут иметь место другие эмпирические закономерности перераспределения пластовых давлений в процессе отбора жидкости и после прекращения отбора. Как известно, глинистые толщи при значительной их уплотненности на больших глубинах заключают заметные количества воды, способной переходить в коллектор при необратимых дефор-

мациях глин. К сожалению, экспериментов на природных пластах-коллекторах в мощных глинистых отложениях в такой постановке, как это сделано для пластов-коллекторов в соленосных толщах, пока не было проведено, несмотря на более широкое распространение глинистых формаций в глубоких пластах многих артезианских бассейнов.

Косвенным подтверждением особенностей деформации малопроницаемых пород, залегающих на контакте с коллектором, при откачке больших количеств воды является пример мощного строительного водопонижения на Южно-Белозерском месторождении. Для наблюдения за деформациями (осадкой) пород водоносного горизонта (бучакские пески) и нижнего водоупора (мергельно-меловые породы) были установлены радиоактивные реперы. При максимальной депрессии в водоносном горизонте около 0,5 МПа было нарушено сцепление упрочения меловых пород и начались их упругие и необратимые осадки с отдачей воды в водоносный горизонт. В результате коэффициент пьезопроводности последнего уменьшился на 1,5 порядка, а условная упругая отдача соответственно возросла на такую же величину. Отметим, что данный эксперимент может служить только косвенным доказательством, так как авторская трактовка механизма перехода отжимаемой воды при уплотнении слабопроницаемых мергельно-меловых пород недостаточно однозначна, и не исключен обычный градиентный переток. К тому же эксперимент проводился в условиях, существенно отличающихся от обстановки в глубоких частях артезианских бассейнов. На больших глубинах из-за принципиально иных физико-механических свойств пород как коллекторов, так и водоупоров, численных значений и характера распределения напряжений, критические величины эффективных напряжений, при которых возникают нелинейные (неупругие) деформации, и закономерности этих деформаций будут иные.

Описанное проявление необратимых деформаций неупругого характера в одном из типов замкнутых пластов-коллекторов, по нашему мнению, имеет не частное значение, а должно наблюдаться в подавляющем большинстве случаев в глубоких водоносных горизонтах при отборах больших количеств пластовых жидкостей и значительных понижениях пластовых давлений. Пока этому явлению не придавалось должного внимания и не были организованы соответствующие наблюдения в районах крупных действующих водозаборов или дренажных систем.

Анализ многочисленных данных по исследованию сжимаемости горных пород на образцах керна и ограниченные эксперименты по изменению деформационных свойств горных пород в их естественном залегании под влиянием отбора жидкости и снижения пластовых давлений позволяет высказать следующие соображения;

— в пластах-коллекторах, представленных уплотненными чистыми песчаниками (без глинистого цемента) или известняками в процессе роста эффективных напряжений под влиянием сниже-

ния поровых (пластовых) давлений должно происходить уменьшение коэффициента упругой сжимаемости и, соответственно, упругой отдачи пласта с сохранением основных закономерностей перераспределения пластовых, характерных для упругих пластов;

— в водоносных комплексах, включающих горные породы, потенциально способные к необратимым неупругого характера деформациям, условная упругая отдача, начиная с некоторого критического значения эффективного напряжения, увеличивается, а перераспределение пластовых давлений в некоторой части влияния водоотбора имеет аномальный, по сравнению с упругими пластами, характер.

По своей значимости изменение упругой или условной упругой отдачи с ростом эффективных напряжений при отборе больших количеств пластовой жидкости может быть сопоставлено с влиянием плановой фильтрационной неоднородности.

К проблеме деформаций коллекторов и изменению их упругой отдачи непосредственно примыкает вопрос об уменьшении проницаемости с ростом эффективных напряжений под влиянием отбора жидкости.

По этому вопросу выполнены теоретические исследования и огромный объем экспериментальных определений на образцах керна, так как этот параметр сравнительно просто устанавливается на серийных установках типа УИПК, АКМ и др. Проведенные исследования однозначно показывают, что проницаемость с ростом эффективных напряжений уменьшается и нелинейно зависит от напряжения.

Максимальное уменьшение проницаемости под влиянием снижения пластовых давлений при эксплуатации месторождений подземных вод в глубоких водоносных горизонтах не должно превышать 5—6 % в коллекторах порового и 15—20 % в коллекторах трещинного типа. В призабойной зоне эксплуатационных скважин, как уже отмечалось, могут происходить значительные изменения проницаемости, что наряду с другими причинами может вызвать снижение удельных дебитов скважин или смещение индикаторных кривых по оси депрессий при исследованиях скважин методом установившихся отборов.

Некоторые аспекты влияния деформаций коллекторов на больших глубинах на оценку эксплуатационных запасов подземных вод

Современные способы оценки эксплуатационных запасов подземных вод в напорных глубоких водоносных горизонтах основаны на теории линейной упругой фильтрации. В соответствии с этой методикой автоматически предполагается, что упругая отдача каждого элементарного объема пласта в зоне влияния водозабора остается постоянной при всех значениях депрессии пластового давления и в любой момент времени увеличения эффективных напряжений в скелете пласта в результате падения порового (пластово-

го) давления. Наблюдаемые на практике отклонения фактических депрессий пластового давления от расчетных (по формулам линейной упругой фильтрации) вызвали необходимость учета гетерогенности фильтрационной среды. Весьма плодотворным, например, оказалось введение понятия о двойной пористости, что позволило для коллекторов некоторых типов повысить достоверность прогнозов по снижению пластовых давлений и при отборе жидкости. На наш взгляд, методы, основанные на предположении линейной деформации пористых сред (даже с учетом их гетерогенности), не во всех случаях дают возможность прогнозировать перераспределение пластовых давлений в глубоких водоносных горизонтах.

Для неоднородных (в некоторых случаях и однородных) пластов, по-видимому, необходимо учитывать их реологические свойства. В настоящее время такие попытки предпринимаются для одномерной (компрессионной) нелинейной деформации скелета горных пород. Для глубоких водоносных горизонтов учет реологических деформаций пока представляет непреодолимые трудности. Дело в том что существующий математический аппарат для описания фильтрации в пористых деформируемых средах, в том числе реологических, требует знания законов деформации всей системы обобщенно или составляющих систему элементов, хотя бы в виде эмпирических закономерностей. Такие эмпирические закономерности получены для одномерного уплотнения (разуплотнения) разных типов пород, и с помощью компрессионных испытаний образцов представляется возможным уточнить коэффициенты эмпирических зависимостей для каждого конкретного объекта. Как уже отмечалось, для коллекторов на больших глубинах необходимо учитывать всестороннее сжатие и неравенство напряжений σ_r и $\sigma_б$. В лабораторных условиях получить эмпирические закономерности деформации (с учетом времени) для таких условий технически невозможно и выходом из создавшегося положения было бы проведение натурных экспериментов. Постановка и проведение таких экспериментов станут возможны, если будет признана существенная роль реологических деформаций коллекторов и влияние этого процесса на достоверность оценки эксплуатационных запасов подземных вод. На современной стадии изученности коллекторов на больших глубинах можно говорить только о тенденциях и возможных отклонениях фактических депрессий пластовых давлений от расчетных под влиянием необратимых нелинейных деформаций скелета коллекторов.

В пластах-коллекторах, сложенных уплотненными чистыми песчаниками без глинистого цемента или пористыми известняками с практически непроницаемой матрицей, в связи с уменьшением коэффициента сжимаемости скелета коллектора и ростом эффективного напряжения следует ожидать увеличение темпа падения пластового давления, происходящего частично за счет снижения проницаемости, но в основном за счет снижения упругой отдачи пласта. Возникновение этого явления следует связывать с упрочнением скелета породы при снижении пластового давления. Такой

процесс в соответствии с экспериментальными данными должен носить нелинейный затухающих характер, т. е. значения коэффициентов сжимаемости приближаются к некоторому пределу. Влияние на него могут оказывать задержки с прогибанием кровли водоносного горизонта вследствие жесткости последней.

Если предположить постоянство проницаемости и водопроводимости пласта-коллектора в зоне влияния водозабора, то ориентировочно погрешность из-за неучета упрочения скелета в определении темпа падения пластового давления в однородном напорном пласте на некоторый период эксплуатации $t(\delta\Delta P_t)$ может быть определена следующим образом:

$$\delta\Delta P_t = \left(\frac{\beta_1}{\beta_0}\right)\cdot\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 + \left[1 - \left(\frac{r_0}{R}\right)\right]^2, \qquad (80)$$

где β_0 — начальное значение коэффициента упругоемкости пласта; β_1 — изменение значения коэффициента упругоемкости, 1/МПа; R — радиус влияния на момент времени t, м; r_0 — радиус зоны с коэффициентом упругоемкости β_1, м.

Для грубых оценок выполнены расчеты по выражению (80), которые показывают, что при различных соотношениях β_1/β_0 и r_0/R темп роста фактических депрессий может отклоняться от расчетных величин в 1,5—2 раза, причем фактический темп должен превышать расчетный. Трудность прогнозирования возможного изменения темпа падения пластового давления в эксплуатационных скважинах по причине изменения коэффициента сжимаемости скелета коллектора заключается в том, что изменение коэффициентов упругоемкости возникает в некотором диапазоне эффективных напряжений и с ростом последнего постепенно распространяется по пласту. Наиболее заметно этот процесс проявляется в зоне водозабора, так как сокращение упругой отдачи пласта при постоянном водоотборе должно компенсироваться повышением темпа снижения пластового давления прежде всего в ближней зоне. Возникающая при этом картина перераспределения пластовых давлений качественно аналогична снижению водопроводимости при приближении к водозабору. Проявляется это в увеличении гидравлических уклонов во времени, т. е. пьезометрическая поверхность депрессионной воронки в зоне квазистационарного снижения не параллельна.

В неоднородных водоносных комплексах: терригенных с включением глинистых прослоев и глин, карбонатных с трещинным типом коллектора и других также следует предполагать отклонения фактических депрессий от расчетных, но уже другого знака по сравнению с рассмотренным выше случаем. Вследствие проявления реологических деформаций как самих коллекторов, так и главным образом глинистых разностей пород с ростом эффективных напряжений в скелете будет наблюдаться снижение темпа падения пластового давления в пласте-коллекторе. Один из примеров влияния реологических деформаций на характер перераспределе-

ния пластового давления в процессе отбора жидкости был уже описан.

В коллекторах с включениями пород глинистого типа характер деформаций более сложный. В процессе падения пластового давления на контакте глин с жидкостью снижается гидростатическое давление; в то же время в скелете глинистых пород растет эффективное напряжение за счет уменьшения нейтрального (взвешивающего) давления жидкости в коллекторе (горное давление на глины передается через жесткие контакты минеральных зерен). Таким образом, на контакте глин создается точечный перепад давлений и потенциально улучшаются условия для поступления воды из глин в коллектор. Такие же перепады могут создаваться в порах глин. Так как уплотнение глин на больших глубинах почти полностью завершено, то дальнейшему уплотнению они могут подвергаться путем вторичной консолидации, предполагающей деформации типа ползучести скелета глин и пленок воды. Процесс деформаций такого типа трудно прогнозировать для условий больших глубин и невозможно воспроизвести в лабораторных условиях. Как уже отмечалось, эксперименты могут быть организованы и проведены на изолированных пластах-коллекторах ограниченных размеров в мощных глинистых толщах.

В соответствии с теорией наследственной ползучести и экспериментальными исследованиями при одноосном сжатии скорость ползучести должна быть затухающей. Можно предположить, что реологические деформации глинистых пород возникают при определенных значениях $\sigma_{эф}$ и затем с ростом $\sigma_{эф}$ постепенно затухают, стремясь в пределе к состоянию, при котором пористость глинистых пород принимает нулевые значения. При этом происходят необратимые перестройки скелета глинистых пород, а трещины, имевшие место при первоначальном соотношении напряжений, полностью закрываются. Это предотвращает фильтрационные перетоки из смежных горизонтов даже при небольшой мощности глинистых прослоев. Описанные деформации должны приводить к эффекту замедления темпа падения пластового давления на определенном этапе эксплуатации продуктивного пласта или увеличению условной упругой отдачи пласта. Такой эффект проявляется в определенном интервале общего периода разработки пласта; удельная добыча жидкости при этом будет расти по сравнению с расчетной и затем вновь качественно станет соответствовать теоретическим закономерностям. Данный эффект следует рассматривать как положительный момент, приводящий к увеличению эксплуатационных запасов. Однако вследствие роста эффективных напряжений и реологических деформаций глинистых пород могут возникнуть и отрицательные последствия, приводящие к частичной или полной гидравлической изоляции пласта-коллектора (подробнее этот процесс рассмотрен ниже).

Эффекты неупругих деформаций глинистых пород будут проявляться в большинстве водоносных комплексов, но наиболее четко в закрытых пластах-коллекторах. С того момента, когда начи-

нается влияние непроницаемых границ, удельная добыча жидкости при упругих деформациях является в таких пластах постоянной величиной. Вследствие возникновения неупругих (реологических) деформаций глинистых пород, скорость которых затухает по экспоненциальной зависимости, удельная добыча жидкости будет нарастать и через некоторый период вновь станет практически стационарной, но численное значение ее будет больше первоначальной величины. Проявление реологических деформаций пород глинистого типа с эффектом замедления темпа падения пластовых давлений в процессе разработки продуктивных пластов наиболее вероятно в закрытых пластах-коллекторах глинистых толщ с аномально высокими пластовыми давлениями, в мощных водоносных комплексах с частым переслаиванием песчаных и глинистых пород бассейнов с мезозойским и кайнозойским осадочным чехлом (покурская свита в Западно-Сибирском артезианском бассейне, красноцветная толща в Западно-Туркменском бассейне и др.).

Влияние глинистой составляющей коллекторов на формирование депрессии

Известно, что большинство песчаных коллекторов содержат некоторое количество глинистого вещества в виде цемента, линз, пропластков и т. д., в различной степени подвергшегося эпигенетическим преобразованиям. При этом свойства глин резко отличаются от свойств твердого скелета, в первую очередь способностью к необратимым (неупругим) деформациям. Напомним также, что любые горные породы могут испытывать не только упругие, но и необратимые деформации. Критическое давление, при котором начинается этот процесс, будет разным для разных пород — очень большим для большинства песчаных, скальных и полускальных и сравнительно малым — для глинистых. При этом и характер необратимых деформаций будет различным: в первом случае это в основном разрушение, а во втором — пластические деформации.

Обратим внимание, что при любой деформации глин из них будет отжиматься поровая вода. При необратимом пластическом деформировании количество отжимаемой жидкости резко возрастает, а обратного процесса не происходит — при снятии нагрузки обратное насыщение водой по своему масштабу значительно меньше отжатия — гистерезис (рис. 59). Рассмотрим, что же произойдет в песчано-глинистом пласте под влиянием эксплуатации. Учтем также, что при эксплуатации глубоких горизонтов вод, в частности промышленных, депрессии пластовых давлений могут достигать нескольких мегапаскалей. При пуске откачки предполагаются следующие этапы распространения возмущения.

Этап 1. Давление в водоносном пласте падает. Депрессия распространяется по песчаным прослоям. Возникает градиент давления между песчаными и глинистыми составляющими пласта. Депрессия распространяется сравнительно быстро, и при хороших

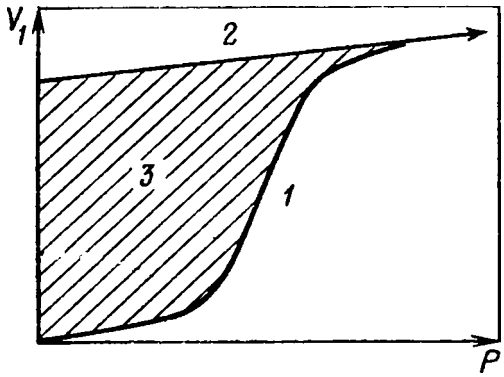


Рис. 59. Схема выделения воды из глин в процессе необратимого сжатия при эксплуатации подземных вод.

1 — падение давления; *2* — восстановление давления; *3* — объем выделившейся воды

коллекторских свойствах воронка будет пологой, а градиент между различными составляющими горизонта одинаковым в большом объеме пласта. Темп падения давления на этом этапе описывается обычными формулами упругого режима.

Этап 2. При достижении определенного перепада давлений между песчаными и глинистыми прослоями начинается фильтрация из глин. Она сопровождается соответствующим падением порового давления, постепенно распространяющимся внутрь глинистого элемента пласта. Падение порового давления сопровождается увеличением эффективного давления на элемент глины, способствующего его сжатию. Темп падения давления в коллекторе на этом этапе описывается также формулами упругого режима, но как для пласта с двойной пористостью.

Этап 3. Эффективное давление на глину достигает некоторой критической величины, превышающей сопротивление необратимым деформациям. Отжатие воды из глин возрастает по сравнению с упругим сжатием. Темп падения порового давления в глинах снижается, а затем ввиду слабых фильтрационных свойств глины и невозможности быстрого перетекания отжимаемой воды в пласт начинает возрастать. При этом, учитывая наличие у глин реологических свойств (последействие, инерционность процесса усадки), поровое давление может даже превысить статическое (в пределе достичь геостатического). На этом этапе в связи с поступлением в коллектор дополнительного количества воды, падение пластового давления в нем замедляется. Прогноз изменений напоров на этапе 3 в настоящее время невозможен. Законы упругой фильтрации здесь нарушаются, а для расчетов с учетом неупругих деформаций не только отсутствуют расчетные формулы, но и, что самое главное, нет методики определения соответствующих коэффициентов для прогноза деформаций, неизвестны законы движения воды из глины в коллектор и многое другое. К тому же лабораторные эксперименты с керном при всей их сложности и неразработанности смогут дать только качественную, но никак не количественную информацию. Последнее связано в основном с высокой степенью микронеоднородности песчано-глинистых пластов, так что любой образец будет обладать случайными характеристиками. Кроме того, при подъеме керна на поверхность из глубоких скважин его механические свойства необратимо и непрогнозируемо изменяются.

Этап 4. Рост порового давления приводит к уменьшению эффективного давления на глину, вследствие чего отжатие воды постепенно уменьшается, а поровое давление стабилизируется. В дальнейшем может начаться новый аналогичный цикл. При этом в течение первого цикла структура глинистого элемента может существенно измениться, изменятся его фильтрационные и емкостные свойства. Поэтому даже если удастся определить параметры процесса на I цикле, их нельзя будет распространять и на II. Описанный процесс будет продолжаться до тех пор, пока глины не уплотнятся полностью до состояния, соответствующего данному эффективному давлению. Это весьма важное обстоятельство, так как в отличие, например, от перетекания, рассмотренный процесс является конечным. Необходимо отметить, что подобные процессы могут происходить не только в элементах глинистых грунтов, заключенных внутри пласта-коллектора, но и с перекрывающими и подстилающими водоупорными породами, если они представлены глинистыми разностями. Последнее было зафиксировано Б. В. Боревским, который измерил непосредственно изменение порового давления в перекрывающем и подстилающем глинистых пластах при длительной откачке.

Рассмотренный процесс может вызвать ряд практически важных следствий.

Пример. Усиленное поступление воды из глин на площадн депрессионной воронки приведет к ее сокращению по сравнению с расчетной и соответствующему уменьшению понижений. По воздействию на ход понижений этот процесс соответствует временному уменьшению коэффициента пьезопроводности, причем он оказывается переменным во времени и пространстве. Чтобы оценить возможные масштабы явления, приведем следующий пример (параметры приняты для условий Западно-Туркменской впадины).

Объем глин — 0,3 объема пласта; пористость начальная — 0,3; конечная — 0,2; средняя депрессия — 200 м; коэффициент фильтрации — 0,15 м/сут. Для этих условий из единицы объема пласта выделится воды: от упругого сжатия $3{,}5 \cdot 10^{-4}$, в результате необратимых деформаций — $3 \cdot 10^{-2}$, что аналогично уменьшению коэффициента пьезопроводности почти на два порядка от $8{,}6 \cdot 10^{4}$ до 10^{3} м^2/сут. Для условий более жестких — объем глин — 0,1; изменение пористости — 0,05, эффективный коэффициент пьезопроводности уменьшается на порядок.

Таким образом, данный процесс может оказать существенное влияние на величину понижений при эксплуатации, особенно на периферийных частях депрессионной воронки. Влияние его на темп падения пластовых давлений при эксплуатации будет возрастать по мере увеличения закрытости пласта.

Выше отмечалось, что вследствие неупругих деформаций коллектора происходит уменьшение эффективного коэффициента водопроводимости вблизи водозабора. Поскольку это процесс противоположен описанному, на самом водозаборе выявить влияние их, как правило, будет затруднительно. Поэтому при постановке натурных экспериментов потребуются специальные наблюдательные скважины, достаточно удаленные от эксплуатационных. Описанный процесс будет проявляться в них в виде эффекта запаздывания, а форма кривой прослеживания будет похожа на таковую

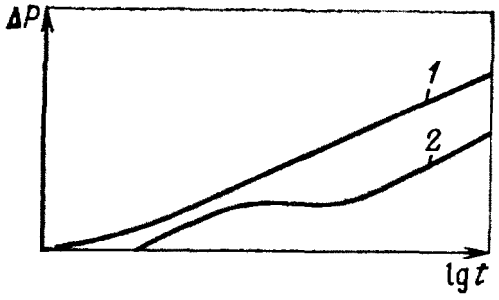


Рис. 60. График прослеживания падения давления.
1 — при упругом режиме, *2* — с учетом необратимых деформаций

при двойной пористости пласта (рис. 60), причем темп снижения уровней в начальный период будет замедленным. Поскольку эффект необратимой деформации глин может быть учтен путем введения некоторого условного коэффициента пьезопроводности, то сохраняется реальная возможность определения необходимых параметров при проведении полевых экспериментов. Детальная их разработка должна быть одной из основных задач следующего этапа исследований.

Важно отметить, что в процессе необратимых деформаций формы кривых падения и восстановления давления будут принципиально различны. Ведь при повышении пластового давления реологические эффекты будут значительно ослаблены, а восстановление первоначальных свойств глин вообще не будет иметь места. В слабо консолидированных породах этот эффект наблюдался неоднократно, однако на настоящий момент нельзя сделать однозначных выводов, так как могли возникать и другие эффекты, например перетекание, а специальные исследования не ставились.

Из сказанного ясно, что описанные процессы могут оказать существенное влияние на точность наших прогнозов при оценке запасов глубоких подземных вод, в связи с чем процессы необратимых деформаций горных пород под влиянием эксплуатации требуют тщательного изучения с целью разработки методик полевого определения их основных характеристик и способов их учета при оценке эксплуатационных запасов.

Изменение граничных условий под влиянием эксплуатации

В процессе разработки глубоких водоносных горизонтов происходит значительное уменьшение пластового давления и соответствующее увеличение эффективной нагрузки, вызывающей деформации породы. Действие этого процесса может вызвать два типа трансформаций граничных условий водоносной системы — изменение фильтрационных свойств перекрывающих и подстилающих относительных водоупоров и изменение гидрогеологической роли секущих толщу разломов.

Большинство водоупорных пород обладает различной фильтрационной проницаемостью. В одних случаях это проявляется в виде перетекания и в естественных условиях. В других — естественных градиентов напоров бывает недостаточно для фильтрации воды через относительный водоупор, но она может начаться в про-

цессе эксплуатации глубоких подземных вод, поскольку возникающие при этом депрессии обычно бывают весьма велики. Уже было показано, что падение пластового и повышение эффективного давления вызывает отжатие воды из глин и их деформацию в процессе вторичной консолидации. Последняя может значительно ухудшить фильтрационные свойства относительно водоупорных пород вследствие уплотнения и исчезновения скрытой вертикальной трещиноватости, в связи с чем перетекание может значительно уменьшиться или даже полностью прекратиться.

Современные методы разведки глубоких подземных вод не позволяют прогнозировать этот процесс на период эксплуатации. Поэтому требуется разработка специальной методики наблюдений в процессе длительной эксплуатации месторождений, лабораторных экспериментов по определению фильтрационных свойств при различной степени сжатия образца глины и т. д. с последующим переносом полученных результатов на разведочные участки. На современной стадии разработанности вопроса схемы с перетеканием при оценке запасов следует применять с большой осторожностью.

Как уже было предположено, основной силой, удерживающей разломы в раскрытом состоянии в слабопроницаемых породах, является давление подземных вод. Величина этого давления обусловлена многими факторами, и в первую очередь действующими силами геостатической и тектонической нагрузки и возможностями оттока отжимающейся воды. Существование таких разломов противоречит принятой гипотезе о равенстве главных нормальных напряжений. Можно полагать, что значения вертикального $P_в$ и бокового $P_б$ напряжений связаны зависимостью $P_б = \varphi P_в$. Определить величину φ можно, анализируя распределение углов падений гидравлически открытых разломов. Для простоты предположили, что взвешивающее давление воды в разломе равно пластовому давлению P_0, а $P_в$ — геостатической нагрузке. Легко показать, что в этом случае величина

$$\varphi = \left[\frac{P_0}{(P_в \sin \alpha_0)}\right] - \operatorname{ctg} \alpha_0, \qquad (81)$$

где α_0 — угол наклона к горизонту наиболее пологого открытого разлома.

Следовательно, если давление воды меньше сжимающего напряжения, то произойдет закрытие трещины. В условиях длительной эксплуатации, сопровождающейся развитием мощной и обширной депрессии, может наступить момент, когда это соотношение будет достигнуто. В этом случае роль разлома как гидравлической границы может постепенно изменяться — прежде открытый разлом, служивший каналом гидравлической связи между блоками и горизонтами, превратится в непроницаемую границу. Прогнозирование этого явления для каждого разлома становится возможным, если известны величины φ и α_1. Критическое пласто-

вое давление $P_{кр}$, при котором может произойти «закрытие» проводящего разлома, можно определить по следующей зависимости:

$$P_{кр} = P_0 \left[\frac{(\cos \alpha_1 + \varphi \sin \alpha_1)}{(\cos \alpha_0 + \varphi \sin \alpha_0)} \right], \quad (82)$$

а критическое понижение

$$S_{кр} = P_0 \left[1 - \frac{(\cos \alpha_1 + \varphi \sin \alpha_1)}{(\cos \alpha_0 + \varphi \sin \alpha_0)} \right], \quad (83)$$

где α_1 — угол наклона плоскости рассматриваемого разлома к горизонту.

Поскольку разлом является не абсолютно открытым, описанный процесс потребует некоторого времени после достижения критического понижения. Анализ имеющегося материала показал, что величина φ для условий, например, Южно-Каспийской впадины, составляет 0,35—0,4, т. е. весьма близка к коэффициенту Пуассона для деформаций.

Таким образом, анализ многочисленных экспериментальных данных по определению упругих свойств горных пород, единичные эксперименты на природных объектах и опыт разработки некоторых месторождений нефти, подземных вод в глубоких нефте- или водоносных пластах в соответствии с изложенными в разделе положениями, по нашему мнению, требуют при гидрогеологических прогнозах перераспределения пластовых давлений в водоносных горизонтах необходимости учета изменения упругих свойств водовмещающих пород и возникновения реологических (необратимых) деформаций с ростом эффективных напряжений в скелете коллекторов под влиянием отборов больших количеств жидкости.

Гипотетически следует предполагать, что вследствие снижения коэффициентов объемной сжимаемости пор и скелета в однородных пластах-коллекторах при некоторых критических значениях постоянный водоотбор будет сопровождаться нарастанием темпа падения пластового давления в эксплуатационных скважинах, а при возникновении реологических деформаций типа ползучести — замедлением темпа падения пластового давления. Недоучет этих явлений может приводить к значительным погрешностям при прогнозе понижений на водозаборных участках и особенно при оценках взаимовлияния водозаборов, сопоставимым по своей величине с погрешностью определения водопроводимости пород-коллекторов в зоне влияния водозабора.

Существенное влияние неупругих деформаций на закономерности перераспределения пластовых давлений в пластах-коллекторах под влиянием отбора из них жидкости можно считать установленным фактом, требующим дальнейшего изучения. Задачами изучения неупругих (реологических) деформаций являются: установление эмпирических закономерностей этих деформаций на соответствующих природных объектах, разработка методики проведения экспериментов на таких объектах, подбор физических моделей процесса и математическое описание его, организация и проведе-

ние наблюдений за перераспределением пластовых давлений в пластах-коллекторах различного типа в районах действующих водозаборов и др. Особенно этот процесс будет проявляться в коллекторах, представленных относительно пластичными и трещиноватыми породами, в молодых гранулярных породах, содержащих значительные количества глинистого материала в виде цемента, линз, прослоев и т. д.

С достаточной степенью уверенности можно предполагать, что описанные процессы в ряде случаев могут существенно изменять граничные условия водоносных горизонтов, трансформируя свойства относительных водоупоров и проводящих разломов.

Глава 11

ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

К настоящему времени накоплен опыт и разработана методика геолого-экономической оценки месторождений твердых полезных ископаемых, нефти и газа. В значительно меньшей степени исследованы и практически применяются общие принципы геолого-экономической оценки месторождений подземных вод, в частности промышленных и термальных. Для пресных и минеральных подземных вод в связи с их целевым назначением и спецификой использования факторы эксплуатации экономического характера не всегда являются определяющими. Оценка эксплуатационных запасов этих вод в большинстве случаев учитывает кондиционные требования к их составу и очень редко — к экономическим показателям их эксплуатации вследствие того, что использование таких подземных вод в большинстве случаев жизненно необходимо для обеспечения хозяйственно-питьевого водоснабжения населения и бальнеотерапии. Однако и в этих случаях требуется технико-экономическое сопоставление возможных вариантов водоснабжения (например, из подземных, поверхностных вод, за счет опреснения морских или минерализованных подземных вод, и др.) для выбора наиболее экономически целесообразного варианта. Ниже изложены принципы и методы геолого-экономической оценки месторождений промышленных подземных вод. Особенности такой оценки для месторождений термальных подземных вод приведены в настоящей главе.

Промышленные подземные воды представляют собой добываемую из земных недр материальную субстанцию, из которой путем ее химических и физических преобразований могут быть получены вещества, используемые в качестве промышленного сырья или предметов потребления, т. е. товарная продукция. Это позволяет рассматривать промышленные подземные воды как жидкую руду и применять при геолого-экономической оценке их месторождений основные положения и методические приемы, применяемые при геолого-экономической оценке рудных месторождений. В то же

время следует учитывать ряд специфических особенностей, отличающих геолого-экономическую оценку месторождений промышленных подземных вод от аналогичной оценки рудных месторождений. Эксплуатационные запасы подземных вод измеряются не весовыми единицами, а расходом водозаборов (в $м^3$/сут), гарантированным на определенное время (обычно 10 000 сут). Одновременно с утверждением запасов подземных вод фиксируется производственная мощность (т/год) перерабатывающего предприятия и расчетный срок его работы. К запасам подземных вод в отличие от запасов твердых полезных ископаемых неприменимы такие понятия, как оконтуривание, прирезка, блок и др. В основе подсчета запасов подземных вод лежат не геометрические построения, а гидродинамический и гидрохимический прогнозы изменения во времени условий эксплуатации.

Основные положения методики геолого-экономической оценки месторождений промышленных подземных вод применимы также для оценки попутных подземных вод, добываемых в процессе разработки месторождений других полезных ископаемых, месторождений поверхностных рассолов (рапы), используемых в качестве гидроминерального сырья, а также для оценки месторождений термальных вод. В последнем случае в качестве товарной продукции рассматривается тепловая энергия. Методика геолого-экономической оценки месторожений промышленных подземных вод базируется на законодательстве Союза ССР и союзных республик о недрах и действующих нормативных документах Госплана СССР, Госстроя СССР, ГКЗ СССР и Мингео СССР.

ЗАДАЧИ И ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Объектом геолого-экономической оценки может являться или месторождение промышленных подземных вод, или его отдельный эксплуатационный (водозаборный) участок, т. е. часть месторождения, на которой предполагается расположить эксплуатационный водозабор. Геолого-экономическая оценка с разной степенью детальности делается на всех стадиях геологоразведочных работ и в процессе эксплуатации месторождения, если возникает необходимость в переоценке запасов промышлнных вод.

Важнейшим результатом геолого-экономической оценки месторождений является обоснование кондиций, т. е. совокупности требований к качеству подземных промышленных вод (физико-химическим свойствам, концентрациям полезных компонентов и др.) и к основным условиям их добычи, определяющим эффективность их использования в народном хозяйстве. Параметры кондиций выражаются предельными значениями натуральных показателей, характеризущих подземные воды и условия их добычи, при которых промышленное использование этих вод является технически возможным и экономически целесообразным.

По результатам промышленной разведки разрабатываются временные кондиции, которые утверждаются заинтересованными отраслевыми министерствами или в сложных случаях ГКЗ СССР. По результатам детальной и эксплуатационной разведок разрабатываются постоянные кондиции, которые утверждаются ГКЗ СССР. Обоснование и порядок утверждения постоянных кондиций регламентируются Инструкцией [17]. Кондиции после их утверждения в установленном порядке являются основанием для подсчета и утверждения эксплуатационных запасов и подразделения их на балансовые и забалансовые. К б а л а н с о в ы м относятся запасы, использование которых в настоящее время и в ближайшей перспективе экономически целесообразно исходя из существующей потребности и обеспеченности промышленности данным видом сырья, достигнутого уровня техники и технологии добычи и переработки подземных вод, соблюдения требований по рациональному использованию недр и охране окружающей среды. К з а б а л а н с о в ы м относятся запасы, использование которых в настоящее время технически невозможно или экономически нецелесообразно, но которые могут быть в дальнейшем переведены в балансовые. Основными причинами отнесения запасов к забалансовым являются большая глубина динамического уровня, превышающая технические возможности существующих водоподъемных средств, отсутствие технологии извлечения некоторых полезных компонентов, нерешенность проблемы сброса отработанных вод и др. Забалансовые эксплуатационные запасы промышленных подземных вод подсчитываются и учитываются в том случае, если доказана возможность их последующего извлечения и использования. Проектируемые системы отработки месторождений и захоронения промстоков должны предусматривать сохранность забалансовых запасов в недрах.

Цель геолого-экономической оценки на п о и с к о в о й стадии разведки — обосновать целесообразность вовлечения месторождения в разведку. На этой стадии составляются технико-экономический доклад (ТЭД) или технико-экономические соображения (ТЭС) о целесообразности освоения месторождения в целом. В рамках ТЭД дается сравнительный анализ ожидаемых технико-экономических показателей освоения различных участков месторождения, сопоставление с действующими и проектируемыми предприятиями по добыче и переработке подземных промышленных вод. В результате такого анализа выделяются перспективные участки и очередность их дальнейшего изучения.

Цель геолого-экономической оценки на стадии п р е д в а р и т е л ь н о й разведки — дать экономическое обоснование целесообразности постановки детальных разведочных работ или отказа от дальнейшей разведки месторождения (участка). На этой стадии составляется ТЭО (технико-экономическое обоснование) или ТЭД, содержащий проект временных кондиций. На основе этих документов после согласования в установленном порядке выбирается участок для детальной разведки.

На стадии детальной разведки цель геолого-экономической оценки — экономическое обоснование целесообразности вовлечения в народнохозяйственное использование разведанного месторождения (участка), строительства (при детальной разведке эксплуатируемого месторождения — расширения, реконструкции) предприятия по добыче и переработке подземных вод. На этой стадии составляются ТЭО и проект постоянных кондиций. При переоценке запасов промышленных вод по данным эксплуатационной разведки, а также в других случаях, предусмотренных инструкциями ГКЗ СССР, геолого-экономическая оценка делается с целью обоснования и утверждения новых кондиций.

Основным экономическим принципом оценки месторождений является обеспечение рентабельности производства по добыче и переработке подземных промышленных вод при максимальном использовании их запасов. Для реализации этого принципа параметры кондиций определяются исходя из условия безубыточности добычи и переработки каждого кубометра балансовых запасов этих вод. Одновременно должна быть обеспечена окупаемость капиталовложений в промышленное освоение оцениваемого месторождения (участка) на уровне не ниже нормативного. Важнейшим требованием к геолого-экономической оценке месторождений является оценка народнохозяйственной эффективности последующего их освоения. Для выполнения этого требования необходимо:

— проанализировать текущую и перспективную потребность в продукции, которая может быть получена из подземных вод оцениваемого месторождения, и возможные источники этой потребности с учетом действующих и проектируемых в СССР предприятий, а также экспортно-импортных операций;

— предусматривать максимально полное и комплексное использование промышленных подземных вод, получение из них всех полезных компонентов, извлечение которых экономически целесообразно;

— предусматривать безусловное выполнение всех законодательных актов по охране недр и окружающей среды, соблюдение природоохранных нормативов;

— полностью учитывать затраты, возникающие в связи с освоением оцениваемого месторождения (участка), в том числе — и в других отраслях народного хозяйства (компенсация за изъятие сельскохозяйственных и лесных угодий, погашение затрат на геологоразведочные работы, капиталовложения в создание и развитие производственной и социальной инфраструктуры и др.);

— учитывать народнохозяйственные планы промышленного и хозяйственного освоения новых территорий, строительства транспортных магистралей, создания ТПК и проведения других мероприятий по размещению производительных сил на территории страны.

В процессе геолого-экономической оценки на всех стадиях разведочных работ с различной степенью детальности должны быть решены три основные задачи:

— определены ожидаемые технико-экономические показатели эксплуатации месторождения (участка);

— обоснованы параметры кондиций для подсчетов запасов подземных вод применительно к оптимальному варианту разработки месторождения (участка);

— дана оценка народнохозяйственной значимости месторождения (участка).

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

При геолого-экономической оценке месторождений (участков) промышленных подземных вод используются приведенные ниже основные технико-экономические показатели освоения месторождения промышленных подземных вод:

Производительность промысла, тыс. м³/сут	Q
Расчетный срок эксплуатации, лет	T
Среднее содержание полезных компонентов, г/л	M_i
Запасы полезных компонентов, тыс. т	$З_i$
Извлечение полезных компонентов, доли ед.	$И_i$
Цена единицы продукции, руб/т	$Ц_i$
Годовой выпуск продукции:	
в натуральном выражении, тыс. т	A_i
в денежном выражении всего, тыс. руб.	B
в том числе по видам продукции, тыс. руб.	B_i
Капиталовложений в промышленное строительство, всего, млн. руб.	K
В том числе, млн. руб.:	
добыча подземных вод (промысел)	$K_д$
транспортировка (магистр. водоводы)	$K_т$
перерабатывающее предприятие	$K_п$
ликвидация промстоков	$K_л$
Сопряженные капиталовложения, млн. руб.	$K_с$
Годовые эксплуатационные затраты, млн. руб.	C
В том числе, млн. руб.:	
по добыче подземных вод (промысел)	$C_д$
по транспортировке (магистральные водоводы)	$C_т$
по перерабатывающему предприятию	$C_п$
по ликвидации промстоков	$C_л$
по возмещению затрат на геологоразведочные работы	$C_{гр}$
Себестоимость единицы товарной продукции, руб./т	C_i
Прибыль, млн. руб.:	
годовая	$П_г$
за весь срок эксплуатации	$П$
Срок окупаемости капиталовложений, лет	$T_{ок}$
Уровень рентабельности к производственным фондам, %	P

Примечание. Показатели, определяемые раздельно по каждому извлекаемому компоненту, сопровождаются индексом этого компонента ($i=1, 2, \ldots, n$).

Производительность промысла, расчетный срок эксплуатации, содержание полезных компонентов, их запасы и коэффициенты извлечения являются при геолого-экономической оценке исходными показателями. Они определяются в результате поисковых и разведочных работ и технологических исследований. Цена единицы продукции принимается на основании действующих прейскурантов оптовых цен, введенных с 01.01.1982 г. Если технология

переработки промышленной воды предусматривает извлечение какого-либо полезного компонента в виде полуфабриката, то цена получаемого из него товарного продукта должна быть уменьшена на величину стоимости переработки этого полуфабриката в продукцию, отвечающую требованиям соответствующих ГОСТ, ОСТ или ТУ (технических условий).

В особых случаях, когда уровень оптовых цен недостаточен, а необходимость освоения нового месторождения предусмотрена перспективными планами или определяется дефицитом данной продукции, который не может быть перекрыт другими, более дешевыми источниками, допускается применять по согласованию с Госкомцен СССР специальные цены, установленные исходя из замыкающих затрат. Замыкающие затраты определяются как максимальная индивидуальная стоимость получения данной продукции на действующих, строящихся или запроектированных предприятиях независимо от их ведомственной подчиненности и характера исходного сырья. Мелкие и технически отсталые предприятия при этом не учитываются. Для продукции, которая служит или может служить предметом внешней торговли, замыкающие затраты должны устанавливаться с учетом мировых цен. Рассмотрим определение основных показателей перечисленных ранее.

Годовой выпуск продукции рассчитывается по формулам:

$$A_i = 0{,}365 \cdot Q \cdot И_i \cdot M_i; \quad B_i = Ц_i \cdot A_i; \quad B = \sum_{i=1}^{n} B_i. \qquad (84)$$

Капиталовложения в промышленное строительство включают затраты на создание промысла для добычи подземных вод $K_д$, строительство магистральных водоводов от промысла до завода и от завода до полигона для ликвидации промстоков $K_т$, строительство завода по извлечению полезных компонентов из промышленных вод $K_п$ и создание системы ликвидации промстоков $K_л$

$$K = K_д + K_т + K_п + K_л. \qquad (85)$$

Капиталовложения в создание промысла включают затраты на бурение и оборудование скважин, водоподъемное оборудование (погружные или штанговые насосы, компрессоры, эрлифты), водосборные трубопроводы, коммуникации (электролинии, дороги, линии связи), средства автоматики. В расчет принимается максимальное число одновременно работающих скважин с учетом резервных и наблюдательных скважин. Капиталовложения в строительство магистральных водоводов включают затраты на строительство самих трубопроводов от промысла до завода и от завода до полигона для ликвидации стоков, насосных станций с оборудованием и необходимых коммуникаций (электролинии с подстанциями, дороги, линии связи). Капиталовложения в создание завода по извлечению полезных компонентов из подземных вод включают затраты на сооружения по первичной подготовке и подогреву воды, технологические установки и трубопроводы, здания производственных цехов, подсобные и административно-хозяйст-

венные здания, сооружения электроснабжения, водоснабжения и канализации. В составе капиталовложений в создание завода $К_п$ выделяются раздельно затраты на сооружения и оборудование, предназначенные для извлечения каждого полезного компонента $К_{пi}$. Капиталовложения в систему ликвидации промстоков включают затраты на строительство и оборудование отстойников, станций нейтрализации и очистки стоков, фильтрационных бассейнов, поглощающих скважин, насосных станций и разводящих сетей, необходимые коммуникации (дороги, электролинии с подстанциями, линии связи).

В составе капиталовложений во всех элементах производственного комплекса учитываются также затраты на: компенсацию за изъятие сельскохозяйственных и лесных угодий и рекультивацию временно используемых земельных участков; 2) вырубку леса, расчистку, планировку и благоустройство территории промышленного строительства; 3) строительство временных зданий и сооружений, проектно-изыскательские и непредвиденные работы, авторский надзор и прочие внеобъемные затраты, регламентируемые инструкциями Госстроя СССР в размерах определенных процентов от основных капиталовложений.

Для сравнения вариантов, содержащих разновременные капиталовложения, и для суммирования разновременных капиталовложений приводим их к сопоставимому виду дисконтированием отсроченных вложений по формуле

$$К_t' = К_t (1 + r)^{-t}, \qquad (86)$$

где $К'_t$ — приведенные капиталовложения; $К_t$ — реальные капиталовложения в t-ом году от начала эксплуатации; r — норматив дисконтирования, принимаемый равным 0,08.

Сопряженные капиталовложения включают затраты на создание и развитие социальной и промышленной инфраструктуры, необходимой для нормальной работы проектируемого предприятия по добыче и переработке подземных вод. Сюда относятся строительство жилья, культурно-бытовых и лечебных учреждений, а также долевое участие в строительстве или расширении энергетических, транспортных, водохозяйственных объектов общего пользования. Затраты на жилищное строительство определяются исходя из дополнительной численности работников, удельного веса градообразующей группы населения, нормативов обеспечения жилой площади и стоимости 1 м^2 жилья. Эти данные имеются в исполкомах Советов народных депутатов. Затраты на строительство культурно-бытовых и лечебных учреждений определяются на основании действующих нормативов (СНиП П-60-75 часть II) и типовой стоимости планируемых объектов. Сопряженные капиталовложения не образуют основных фондов предприятия по добыче и переработке подземных вод и не учитываются при расчетах себестоимости продукции, рентабельности и сроков окупаемости капиталовложений.

Годовые эксплуатационные затраты С слагаются из текущих расходов на добычу $С_д$, транспортировку $С_т$, переработку $С_п$ подземных вод, ликвидацию промстоков $С_л$ и возмещение затрат на геологоразведочные работы $С_{гр}$:

$$С = С_д + С_т + С_п + С_л + С_{гр}. \quad (87)$$

Состав затрат и методы их калькулирования определяются «Основными положениями по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции на промышленных предприятиях», утвержденными Госпланом СССР, Госкомцен СССР, ЦСУ СССР и Минфином СССР.

Во всех элементах производственного процесса калькуляцией эксплуатационных затрат учитываются: зарплата основного производственного персонала; энергозатраты (электроэнергия, тепло, пар и т. д.); материалы; содержание и эксплуатация оборудования; цеховые расходы; общезаводские расходы; внепроизводственные расходы.

Зарплата производственного персонала определяется исходя из нормативной численности и средней заработной платы с учетом районных коэффициентов и отчислений на социальное страхование. Затраты на электроэнергию и тепловую энергию устанавливаются на основании прейскуранта 09-01 по двухставочному тарифу: за потребляемую активную энергию (в кВт·ч) и максимальную мощность одновременно работающих потребителей (в кВА). Для ориентировочных расчетов можно принимать, что затраты активной энергии на подъем 1 м^3 на высоту 1 м составляют 0,005 кВт·ч. Горизонтальное перемещение воды на расстояние 1 км по затратам энергии приравнивается к ее подъему на 5 м. На закачку 1 м^3 промстоков при их подземном захоронении расходуется примерно 0,5 кВт·ч на 1 МПа избыточного давления на устье нагнетательной скважины. Зная потребляемую активную энергию, можно оценить ориентировочно максимальную установленную мощность, разделив годовой расход энергии в киловатт часах на 5500÷6000 ч. Затраты всех видов энергии (электроэнергия, пар, природный газ, сжатый воздух и др.), а также расход материалов (химических реагентов) на водоподготовку, извлечение полезных компонентов и очистку стоков рассчитываются по расходным коэффициентам, получаемым в результате технологических исследований. Стоимость химических реагентов определяется по действующим прейскурантам оптовых цен с учетом транспортно-заготовительных расходов.

Затраты на содержание и эксплуатацию оборудования включают расходы на реновацию, капитальный и текущий ремонт оборудования и основных технологических сооружений (скважин, трубопроводов и т. д.). Эти расходы нормируются в процентах от стоимости оборудования и сооружений. Затраты на реновацию и капитальный ремонт принимаются в соответствии с нормами амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства. При особо агрессивных свойствах сырьевой воды эти нормы

могут быть скорректированы в сторону увеличения амортизационных отчислений с учетом реальных сроков службы скважин, насосов, трубопроводов и другого оборудования. Затраты на текущий ремонт принимаются в соответствии с отраслевыми нормативами химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Отчисления на реновацию выделяются отдельной строкой.

Цеховые расходы включают заработную плату цехового персонала с отчислениями на социальное страхование, расходы по охране труда (планируются в процентах от основной заработной платы), расходы на амортизацию, содержание и текущий ремонт зданий и сооружений (в процентах от стоимости) и прочие затраты (в процентах от перечисленных цеховых расходов). Общезаводские расходы планируются в процентах от стоимости переработки сырья, внепроизводственные расходы — в процентах от заводской себестоимости.

На основе калькуляций затрат по элементам производства рассчитывается себестоимость сырьевой воды франко-приемные емкости перерабатывающего завода и себестоимость ликвидации промстоков (на 1000 м^3 воды и стоков). Вычисляется также себестоимость продукции собственных вспомогательных цехов — тепла, пара, сжатого воздуха, воды, химических реагентов, получаемых на том же заводе. Себестоимость единицы товарной продукции определяется на основании плановой калькуляции, составляемой в соответствии с действующей отраслевой инструкцией.

Если предусматривается выпуск только одного вида продукции, то его себестоимость C_1 определяется простым соотношением $C_1 = C : A_1$.

При двух и более видах продукции показатель себестоимости C_i является условным, поскольку распределение общих затрат (на сырьевую воду, ликвидацию промстоков, услуги вспомогательных цехов и т. д.) между отдельными видами продукции строго не регламентировано. При существующей практике в плановых калькуляциях общие затраты распределяются обычно пропорционально ценности (годовому выпуску в денежном выражении) каждого вида продукции. Такой метод может привести к ошибочным выводам. Чтобы избежать ошибок, общие затраты следует распределять таким образом, чтобы рентабельность (к себестоимости) всех видов продукции была бы одинаковой. При этом, конечно, должно соблюдаться равенство

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i A_i. \qquad (88)$$

Годовая прибыль $П_г$ определяется как разность между годовым выпуском продукции в денежном выражении B и годовыми эксплуатационными затратами C:

$$П_г = B - C. \qquad (89)$$

По мере отработки балансовых запасов условия эксплуатации ухудшаются: снижаются динамический уровень и дебит промысло-

вых скважин, повышается давление закачки, снижается приемистость нагнетательных скважин, может изменяться химический состав подземных вод. Все это приводит к снижению годовой прибыли. Для реальной оценки сроков окупаемости капиталовложений и рентабельности планируемого производства необходимо знать динамику годовой прибыли в течение расчетного срока эксплуатации месторождения (участка). Для этого прибыль определяется применительно к условиям 1-, 5-, 10-, 15-го и последнего года эксплуатации, а также на планируемые моменты изменения технологии (например, при переходе от эрлифтов к погружным насосам). Для всех промежуточных лет размер годовой прибыли определяется линейной интерполяцией.

Срок окупаемости капиталовложений в промышленное строительство является одним из важнейших технико-экономических показателей, поскольку он служит критерием эффективности капиталовложений и в качесте такового определяет очередность вовлечения разведочных участков в хозяйственное освоение. Реальный срок окупаемости капиталовложений $T_{ок}$ определяется как число первых лет эксплуатации месторождения (участка), в течение которых сумма полученной прибыли сравнивается с суммой капиталовложений в промышленное строительство:

$$К = \sum_{t=1}^{T_{ок}} (П_г)_t. \qquad (90)$$

Перечень определяемых при геолого-экономической оценке месторождений технико-экономических показателей одинаков для всех стадий поисково-разведочных работ, но обоснования и достоверность показателей, естественно, различны. На стадии поисков технико-экономические показатели определяются весьма укрупненно и, главным образом, на основании аналогии с действующими или запроектированными предприятиями. Выбор аналогов должен быть обоснован сходством основных природных условий, определяющих объемы капиталовложений и себестоимость продукции. Целесообразно подобрать аналоги отдельно для каждого из элементов производства: добычи, транспортировки, переработки воды, ликвидации промстоков. Некоторые различия между условиями оцениваемого месторождения (участка) и предприятия-аналога могут быть учтены расчетным путем. Так, влияние объемов производства Q на величину капиталовложений К и себестоимость единицы продукции С при прочих равных условиях может быть определено из соотношений

$$К_2 : К_1 = (Q_2 : Q_1)^{\beta}; \quad C_1 : C_2 = (Q_2 : Q_1)^{\beta'}; \text{ при } Q_2 > Q_1.$$

Показатели степени соответственно равны $\beta = 0{,}65 \div 0{,}75$; $\beta' = 0{,}1 \div 0{,}2$. Также расчетным путем могут быть скорректированы различия в стоимости строительства и бурения скважин, тарифов на электроэнергию, районных коэффициентов к зарплате и др. На стадии предварительной разведки уже имеются технологические регламенты и в общих чертах выясняется схема будущего пред-

приятия по добыче и переработке подземных вод. Это дает возможность более тщательного обоснования технико-экономических показателей с использованием типовых проектов, укрупненных нормативов и прямых расчетов.

При обосновании постоянных кондиций по результатам детальной разведки технико-экономические показатели определяются расчетным путем с соблюдением всех требований и норм проектирования промышленных предприятий. Наиболее достоверными являются результаты геолого-экономической оценки по данным эксплуатационной разведки, так как они опираются на реальные технико-экономические показатели действующего предприятия.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНДИЦИЙ

В качестве кондиций для подсчета запасов промышленных подземных вод подлежат обоснованию следующие параметры: минимальное содержание полезных компонентов в водах оцениваемого месторождения (участка); максимальное содержание вредных примесей; максимальное понижение динамического уровня в эксплуатационных скважинах; минимальный дебит эксплуатационных скважин.

Если ликвидация промстоков проектируется путем их подземного захоронения, то одновременно обосновываются параметры кондиций для полигона захоронения: минимальная приемистость поглощающих скважин; максимальный напор на устье поглощающих скважин; максимальное содержание вредных примесей в промышленных стоках.

Основное экономическое требование при обосновании кондиций для подсчета запасов промышленных вод выражается соотношением:

$$B_T \geqslant C_T, \tag{91}$$

где B — годовой выпуск продукции в денежном выражении; C — годовые эксплуатационные затраты; индекс T означает, что B и C рассчитываются применительно к условиям, прогнозируемым на конец расчетного срока эксплуатации. Если параметры кондиций определяются экономическими соображениями, т. е. отражают предельные условия безубыточной эксплуатации участка, то соотношение (91) представляет собой равенство.

Рост себестоимости продукции, приводящий в конце расчетного срока к бесприбыльной эксплуатации участка, в общем случае является следствием ухудшения всех показателей кондиций, однако решающим является только один из них. Если при этом остальные показатели кондиций остаются удовлетворительными, должны быть рассмотрены технические возможности улучшения лимитирующего параметра (например, поддержание пластового давления при лимитирующем снижении динамического уровня; применение более совершенной технологии извлечения при лимитирующем содержании полезных компонентов и др.).

Во многих случаях кондиции для подсчета запасов промышленных вод определяются не экономическими соображениями, а вытекают из геологических условий (ограничение допустимого снижения уровня кровлей продуктивного горизонта), технических возможностей (например, скважинных насосов) или хозяйственных потребностей (например, при разведке для обеспечения сырьем действующего предприятия). В этих случаях соотношение (91) представляет собой неравенство, и экономическое обоснование кондиций сводится к проверке знака неравенства при условиях эксплуатации, соответствующим заданным параметрам кондиций.

Среди множества вариантов кондиций, удовлетворяющих условию, необходимо выбрать оптимальный. Критерием оптимальности служит максимум прибыли от реализации получаемой продукции за весь расчетный срок эксплуатации участка:

$$П_{\Sigma} = \sum_{t=1}^{T} (В - С)_t \to \max. \qquad (92)$$

Очевидно, что этот критерий достигает максимума, когда в хозяйственное освоение вовлекаются все запасы подземных вод, которые могут использоваться с выгодой.

Зависимости между параметрами кондиций и технико-экономическими показателями добычи и переработки подземных промышленных вод весьма многообразны, сложны и в общем случае не поддаются аналитическому выражению. Поэтому основным методическим приемом оптимизации является анализ ряда вариантов отработки участка, различающихся набором параметров кондиций и соответствующей им величиной балансовых запасов (производительности промысла).

При выборе конкретных величин параметров кондиций и балансовых запасов в рассматриваемых вариантах нужно учитывать следующее. Расширение производства при прочих равных условиях ведет к сокращению себестоимости единицы продукции и соответствующему росту прибыли. Поэтому среди вариантов с одинаковой технологией добычи, переработки подземных вод и ликвидации промстоков максимум суммарной прибыли П будет у варианта с максимально возможной при данной технологии величиной балансовых запасов. Это дает возможность в большинстве случаев существенно ограничить число рассматриваемых вариантов: для месторождений в артезианских бассейнах со стабильным химическим составом подземных вод по каждой из технически возможных схем добычи и переработки может рассчитываться только один вариант — с максимальными балансовыми запасами.

Оптимальность выбранного варианта должна быть обоснована с точки зрения геологической или технической невозможности или экономической нецелесообразности дальнейшего увеличения запасов с помощью других технологических схем (применение станков — качалок, поддержание пластового давления и т. д.). Каждый из рассматриваемых вариантов должен быть оптимизирован с точ-

ки зрения применения наиболее экономичных технических и организационных решений отдельных элементов производственного процесса. Выбор таких решений осуществляется путем сопоставления технически возможных вариантов по критерию минимума приведенных затрат:

$$C_j + E_н \cdot K_j \rightarrow \min, \qquad (93)$$

где C_j и K_j — удельные эксплуатационные затраты (себестоимость) и удельные капиталовложения на единицу продукции данного участка производства; $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, равный 0,15. Единицей продукции по всем элементам сырьевой базы (добыча, сбор, транспортировка воды) является 1 м^3 промышленной воды франко-приемные емкости завода; по перерабатывающему предприятию — 1 т товарной продукции; по системе ликвидации промстоков — 1 м^3 стоков.

В зависимости от наличия в конкретных условиях оцениваемого участка альтернативных вариантов технических решений экономическому обоснованию подлежат:

— по сырьевой базе — размещение и конструкция промысловых скважин, выбор водоподъемных средств, водосборные сети (конфигурация, диаметр, источники энергии перекачки), трасса и конструкция магистрального водопровода с насосными станциями;

— по перерабатывающему заводу — технология водоподготовки (в том числе возможность концентрирования путем естественного испарения), выбор технологии извлечения полезных компонентов, повторное использование отходов производства;

— по системе ликвидации промстоков — способы нейтрализации и очистки стоков, расположение и конструкция поглощающих скважин, методы искусственного повышения их приемистости, конструкция водопроводных сетей, выбор насосного оборудования.

В расчетах с целью обоснования технических решений себестоимость C_j и капиталовложения K_j могут учитываться не целиком, а только по тем статьям и элементам затрат, которые отличаются в сопоставляемых вариантах.

Подземные промышленные воды в большинстве случаев представляют собой комплексное сырье. Потенциально они являются источником получения I, Br, B, Li, Cs, Rb, Sr, K, Mg, W, различных солей, а также тепловой энергии. Комплексное, максимально возможное в технически и экономически обоснованных пределах использование полезных компонентов и свойств промышленных вод решающим образом влияет на технико-экономические показатели и общую оценку их запасов. Поэтому важнейшим моментом геолого-экономической оценки является обоснование перечня извлекаемых компонентов, включая попутную продукцию, получаемую из отходов основного производства.

В указанный перечень включаются все полезные компоненты, относительно которых выполняются следующие условия: имеется

потребность в данном виде продукции; разработана технология извлечения; соблюдаются соотношения:

$$M_i > \Delta C/(0{,}365 \cdot Q \cdot И_i \cdot Ц_i); \quad (94)$$

$$\Delta K_i \leqslant \sum_{t=1}^{T_н} (B_i - \Delta C_i)_t, \quad (95)$$

где ΔC_i — прирост годовых эксплуатационных затрат, связанный с извлечением i-го полезного компонента, тыс. руб.; ΔK_i — дополнительные капиталовложения в перерабатывающее предприятие, связанные с извлечением i-го полезного компонента, тыс. руб., $T_н$ — нормативный срок окупаемости капитальных вложений. В тот же перечень включается попутная продукция, получаемая из отходов производства, при наличии потребности в ней и соблюдения соотношения.

При обосновании кондиций на термальные воды необходимо исходить из оценки эффективности практического использования термальных вод, которая должна базироваться на комплексе гидрогеотермических, технико-экономических и народнохозяйственных критериев. Иначе говоря, геолого-экономическая оценка месторождения и систем его разработки должна включать как элементы сопоставительной оценки вариантов, так и элементы абсолютной (отраслевой, народнохозяйственной) оценки. Очевидно, что соотношение этих элементов и достоверность самих оценок на различных стадиях поисково-разведочных работ должны быть различными. В общем случае геолого-экономическая оценка месторождений должна исходить из условия удовлетворения заявленной потребности в воде и тепле.

В качестве критерия при технико-экономическом сравнении вариантов может рассматриваться приближенный показатель совокупного эффекта (выигрыша), приносимого термальными водами, — экономический выигрыш в сфере эксплуатации гидрогеотермальных ресурсов, который определяется исходя из экономических оценок получаемой продукции [50]. В качестве такой оценки принимаются предельно допустимые с народнохозяйственной точки зрения приведенные затраты на увеличение производства единицы продукции на базе термальных вод (тепло, горячая вода, электроэнергия) в оцениваемом районе на определенном отрезке времени. Эти затраты рассматриваются как замыкающие $Э_{зам}$ [50]. Разница между $Э_{зам}$ и приведенными затратами рассматриваемого варианта $Э_{пр}$ на прирост или организацию производства единицы указанной продукции (1 ГДж тепла, 1 м^3 горячей воды, 1 квт·ч электроэнергии) и будет являться показателем экономического выигрыша, приносимого эксплуатационными запасами оцениваемого месторождения $П'$. В полном объеме этот показатель П может быть определен с учетом годового объема продукции C, т. е.

$$П' = Э_{зам} = Э_{пр}; \quad П = (Э_{зам} - Э_{пр}) \cdot G. \quad (96)$$

Приведенные затраты $Э_{пр}$ определяются как сумма годовых текущих эксплуатационных затрат (себестоимость годового продукта С и капитальных вложений в водозабор К, приведенных к одинаковой размерности в соответствии с нормативом эффективности капиталовложений $Е_н$

$$Э_{пр} = (С + Е_н К)/G. \quad (97)$$

В формулах (96, 97) определенную трудность представляет оценка уровня замыкающих затрат, приведенных к показателям, сопоставимым с геотермальным вариантом. При оценке запасов месторождений, воды которых предполагается использовать для теплоснабжения конкретных потребителей или для выработки электроэнергии, за уровень показателя $Э_{зам}$ вполне обоснованно можно принимать действующие порайонные тарифы на отпускаемое тепло, горячую воду и электроэнергию Ц. В этом случае показатель П будет одновременно характеризовать общую (абсолютную) эффективность капитальных вложений, выраженную в виде чистой прибыли.

В организациях Министерства газовой промышленности, ведущих эксплуатацию геотермальных месторождений, установлены отпускные цены не за единицу тепла, а за 1 м^3 подаваемой потребителю термальной воды. Поэтому при обосновании кондиций необходимо дополнительно рассматривать вариант, основанный на оценке отраслевой эффективности добычи термальных вод. В этом случае за уровень замыкающих затрат во всех приводимых в настоящем разделе формулах должен приниматься именно этот показатель (отпускная цена за 1 м^3 термальной воды).

Сравнение вариантов разработки, характеризующихся одинаковым годовым объемом производства продукции на базе термальных вод G (тепло, электроэнергия), проводят по удельному показателю П; сравнение вариантов, отличающихся по указанному параметру G, — по показателю П в полном объеме производства. С учетом двух типов задач, решаемых при оценке эксплуатационных запасов подземных вод, оценочные варианты выбираются обычно со следующими ограничениями:

$$Q = Q_з;\ G = G_з;\ S_р \leqslant S_{доп}; \quad (98)$$

более общий случай

$$Q_з \leqslant Q = \max;\ G_з \leqslant G = \max;\ S_р \leqslant S_{доп}. \quad (99)$$

В уравнениях Q, G — производительность водозаборных сооружений по воде и теплу (соответственно); $Q_з$, $G_з$ — заявленная потребность в воде и тепле (соответственно); $S_р$, $S_{доп}$ — расчетное и допустимое понижение уровня воды в скважинах (соответственно). В ряде случаев (ограниченный участок размещения скважин $F_{огр}$, малая площадь распространения водоносного горизонта на

доступных бурению глубинах $F_{гор}$ и пр.) отмеченные ограничения должны быть дополнены следующим:

$$F_в \leqslant F_{огр} \text{ или } F_в \leqslant F_{гор}, \qquad (100)$$

где $F_в$ — площадь размещения водозаборных скважин.

Учитывая определение понятия «эксплуатационные запасы термальных подземных вод» и требования Инструкции ГКЗ СССР [20], кондиционные требования (показатели) должны обосновываться предельными экономическими показателями добычи и использования вод, т. е. исходя из обеспечения предельного уровня рентабельности. Иначе говоря, показатели кондиций должны обеспечивать получение лишь нормативной прибыли, что отвечает условию предельности

$$Э_{пр} = Э_{зам};\ Э_{пр} = Ц \text{ или } П';\ П = 0. \qquad (101)$$

Как видно, условие соблюдается при равенстве прямых приведенных затрат $Э_{пр}$ и отпускной цены Ц на единицу продукции, получаемой на базе эксплуатационных запасов термальных вод (ГДж тепла, 1 кВт·ч электроэнергии, 1 т извлекаемой из вод продукции). Таким образом, соблюдение условий (101) предполагает равноценность экономических показателей использования термальных вод и традиционных видов топливно-энергетических ресурсов, а в случае попутного извлечения промышленных компонентов — традиционных видов сырья, из которого извлекаются эти компоненты.

В случае если обоснованные показатели кондиций обеспечивают разработку месторождения при условии $Э_{пр} < Ц$, т. е. обеспечивают получение чистой прибыли, эксплуатационные запасы можно считать недооцененными, а требования кондиций — завышенными. Задача определения оптимального варианта разработки, обеспечивающего получение максимального экономического эффекта $0 < П'$, $П = max$ при заданном уровне получения продукции на базе термальных вод, решается на следующем этапе промышленного освоения месторождения — при обосновании проекта его разработки.

Изложенные положения касаются обоснования показателей временных и постоянных кондиций по результатам разведочных стадий. При выборе же участков под разведку следует ориентироваться на оптимальный вариант, характеризующийся максимальными показателями $П'$ или П при соблюдении условий (98)—(99). Экономическая оценка вариантов схем размещения и режимов эксплуатации скважин в пределах оцениваемого месторождения (или его участка) производится на основе сравнения результирующего показателя — уровня прямых приведенных затрат и уровня отпускных цен на единицу основной (4,2 ГДж тепла, 1 кВт·ч электроэнергии) и попутной (1 т продукции) продукции. В случае когда на базе оцениваемого месторождения планируется обес-

печение теплой и горячей водой небольших объектов в районах, где нет централизованного теплоснабжения, сравнение геотермальных вариантов должно проводиться с учетом приведенных затрат по котельным соответствующей производительности или же с учетом замыкающих затрат на получение 1 ГДж тепла в данном районе. Последний показатель должен быть определен в зависимости от уровня замыкающих затрат на топливо, его теплотворной способности с учетом ряда дополнительных затрат, связанных с транспортировкой и переработкой топлива в тепло, районного коэффициента удорожания капиталовложений при соблюдении условия сопоставимости сравниваемых вариантов (геотермального и альтернативного) по тепловой мощности и параметрам теплоносителя. При этом в качестве альтернативного источника энергии при геолого-экономической оценке месторождений термальных вод в большинстве районов может быть принят уголь.

Прямые приведенные затраты по каждому варианту оценки эксплуатационных запасов термальных вод $Э_{пр}$ определяются как сумма текущих эксплуатационных затрат (себестоимость С) и капитальных вложений К, приведенных к одинаковой размерности в соответствии с нормативным коэффициентом эффективности капиталовложений $E_н$ по формуле (97).

Капитальные вложения по каждому из рассматриваемых вариантов К включают стоимость эксплуатационных $К_э$ и нагнетательных $К_н$ скважин, насосного оборудования $К_{нас}$ (погружные насосы для эксплуатации скважин, центробежные поверхностные насосы для закачки воды в нагнетательные скважины, насосы на сборных пунктах), сборных (промысловых) трубопроводов — шлейфов $К_{тр}$ и других промысловых сооружений $К_{пс}$, т. е.

$$К = (К_э + К_{пс} + К_{по} + К_{тр} + К_{пс}) \cdot \alpha, \qquad (102)$$

где α — нормативный коэффициент удорожания капитальных затрат для данного территориального пояса.

Следует иметь в виду, что наибольший удельный вес в структуре общих капиталовложений приходится на стоимость скважин (для разных типов месторождений от 60 до 80—85 %). Показатели, входящие в формулу, определяются обычно на основе укрупненных сметных расчетов по прейскурантам и другим нормативным и статистическим документам.

Эксплуатационные затраты С удобно представить в виде годовых затрат $С_1$, общих для всех оцениваемых при обосновании кондиций методов разработки месторождения и способов эксплуатации скважин (без ППД, с ППД, фонтанная, насосная эксплуатация скважин), и затрат $С_2$, учитывающих расход электроэнергии на добычу, перекачку и закачку воды. Эксплуатационные затраты $С_1$ включают отчисления от капиталовложений и оборотных фондов, а также эксплуатационные затраты на сырье и материалы, зарплату обслуживающего персонала, цеховые и общезавод-

ские расходы. В обобщенном виде структура эксплуатационных затрат может быть представлена следующей зависимостью:

$$C_1 = \sum_{j=1}^{n} K_j(\alpha_j + \beta_1) + \beta_2 З_п \cdot Р + П, \qquad (103)$$

где K_j — полные капитальные вложения в отдельные подразделения основных фондов, руб.; α_j — соответствующие нормы отчислений на реновацию и капитальный ремонт от основных фондов; β_1 — коэффициент, учитывающий отчисления от основных фондов в соответствии с требованиями новой системы планирования и экономического стимулирования; $З_п$ — средняя зарплата одного человека обслуживающего персонала с учетом поясного коэффициента к зарплате, руб/год; Р — численность обслуживающего персонала; β_2 — коэффициент, учитывающий отчисления на социальное страхование; П — прочие эксплуатационные затраты по добыче воды, принимаемые обычно в размере 10 % от основных эксплуатационных затрат.

Годовые затраты на подъем, перекачку и закачку воды C_2 определяются исходя из объемов добычи и закачки, высоты подъема воды и давления нагнетания, гидравлических потерь напора в скважинах и водоводах, мощности и к. п. д. наносного оборудования, а также установленных тарифов на электроэнергию. При экономической оценке рассматриваемых вариантов этот показатель может быть определен также по следующей приближенной формуле:

$$C = \sum \frac{Q_j \cdot H_j}{\eta_j} (Ц_1 + Ц_2 T_j), \qquad (104)$$

где Q_j — производительность скважин водозаборного сооружения и объем перекачиваемой воды, м³/сут; H_j — высота подъема воды в скважинах, необходимый напор для перекачки термальных вод на сборный пункт, напор нагнетания, м; η — к. п. д. погруженных (скважинных) и центробежных насосов, применяемых для перекачки и закачки термальных вод; $Ц_1$ и $Ц_2$ — плата соответственно за 1 кВт·ч и за 1 кВт установленной мощности, руб.; T_j — среднее время работы насосных установок в году, ч/год.

В тех случаях, когда использование термальных вод связано с дополнительными капитальными и эксплуатационными затратами предприятий — теплоэнергопотребителей, эти затраты должны быть учтены в виде удельных показателей в прямых приведенных затратах.

Показатели кондиций принимаются по варианту, наиболее полно отвечающему условию предельности (101). При этом следует иметь в виду, что такие показатели кондиций, как минимальная температура воды, максимально допустимая минерализация и предельные содержания отдельных компонентов и их групп, как правило, бывают заранее обусловленными (предпроектными теплотехническими или теплоэнергетическими расчетами, действующими нормативными документами, регламентирующими исполь-

зование и сброс вод и т. д.). В этом случае по предельному варианту выбираются остальные показатели кондиций. Эти показатели могут корректироваться по результатам поисково-разведочных работ и постадийной геолого-экономической оценки изучаемых объектов, оказывая влияние на результаты этой оценки. Так, например, при более низкой температуре вод по сравнению с первоначально заявленной может оказаться целесообразным применение комбинированных систем отопления (с «пиковой» котельной) или увеличение продолжительности «пикового» догрева и т. д. При несоответствии качества вод кондиционным требованиям должны оцениваться схемы с теплообменными устройствами, а также соответствующие схемы водоподготовки и сброса вод (например, путем закачки в недра и т. д.). Все эти вопросы должны быть рассмотрены на поисковой стадии работ, уточнены по результатам предварительной разведки и отражены в проекте временных кондиций.

ДЕНЕЖНАЯ ОЦЕНКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В соответствии с типовой методикой экономической оценки месторождений полезных ископаемых обобщающим показателем, характеризующим народнохозяйственную значимость месторождения, является его денежная оценка.

Показатель денежной оценки месторождения R равен разности между ценностью добываемой продукции и суммарными (эксплуатационными и капитальными) затратами на ее получение за период отработки запасов с учетом фактора времени. Он рассчитывается (в руб.) по формуле

$$R = \sum_{t=1}^{T} \frac{B_t - C_t - K_t}{(1+r)^t}, \qquad (105)$$

где T — расчетный срок эксплуатации месторождения (участка), считая от года начала строительства предприятия, лет; B_t — суммарная ценность годовой продукции t-го года в оптовых ценах; C_t — эксплуатационные (без отчислений на реновацию) затраты t-го года; K_t — капиталовложения в промышленное строительство в t-ом году; r — норматив для приведения к сопоставимому виду разновременных затрат и результатов, принимается $r=0{,}08$.

Показатель денежной оценки месторождения (участка) должен заноситься в кадастр месторождений и периодически (каждую пятилетку) корректироваться с учетом реальной отработки запасов и изменений экономических показателей. Денежная оценка дает возможность сопоставлять народнохозяйственную ценность данного месторождения не только с аналогичными месторождениями, но и с любыми другими элементами национального богатства страны.

ПРИМЕР ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Разведан участок месторождения промышленных подземных вод, расположенного в артезианском бассейне. Продуктивный горизонт имеет площадное распространение и залегает на глубине 1400—1500 м. Средняя глубина промысловых скважин 1550 м. Статический уровень устанавливается на глубине 60 м от поверхности. Естественные водопритоки в скважины при снижении уровня на 40 м составляют 1800—2000 м^3/сут. Поэтому расчетные дебиты скважин определяются производительностью водоподъемных средств. Средняя водопроводимость составляет 15 м^2/сут, коэффициент пьезопроводимости 10^6 м^2/сут.

Продуктивный горизонт содержит рассолы хлоридного натриевого состава с общей минерализацией 250 г/л и следующим содержанием полезных компонентов: I 30 мг/л, Br 250 мг/л, B 20 мг/л, Li 15 мг/л. Щелочность составляет 6 ммоль/л, нафтеновых кислот 1,5 ммоль/л. Газовый состав вод характеризуется абсолютным преобладанием метана (до 99 %). Газовый фактор 1,3 м^3/м^3. Температура воды на устье скважин 25—30 °С. Предполагается, что химический состав и температура воды в процессе эксплуатации остаются постоянными.

Разработаны технологические регламенты получения из подземных вод разведанного участка следующих полезных компонентов: йода технического марки А, брома технического марки А, буры технической, сорта 1, лития хлористого. Кроме того, производственные стоки содержат значительное количество хлорного железа, которое может быть извлечено в виде раствора, соответствующего техническим условиям. Анализ потребности народного хозяйства в указанных видах продукции и источников ее получения показал, что вся предполагаемая продукция будет иметь сбыт, но ни один из ее видов не является дефицитным, поэтому ценность продукции должна измеряться в действующих оптовых ценах.

Единственным способом ликвидации промстоков является их подземное захоронение. Разведан полигон для захоронений стоков, расположенный в 30 км от оцениваемого участка. Имеется возможность закачивать промстоки в поглощающий горизонт N или в продуктивный горизонт промышленных вод. В первом случае условия закачки благоприятные: приемистость скважин до 3000 м^3/сут при давлении на устье 5 МПа, глубина 1000 м. При закачке в продуктивный горизонт условия хуже: приемистость скважин — до 2000 м^3/сут при давлении 10 МПа, глубина 1500 м. Однако закачка в продуктивный горизонт способствует поддержанию пластового давления в этом горизонте, в результате чего расчетное снижение уровня на оцениваемом участке на 80 м меньше.

Перерабатывающий завод предполагается расположить в районе полигона захоронения стоков. Имеются соответствующие согласования на отвод земельных угодий, обеспечение электроэнер-

Таблица 72

Сопоставление цен и затрат по видам продукции (в тыс. руб.)

Виды продукции	Годовые затраты на извлечение	Цена годового выпуска продукции	Прибыль (+), убыток (—)
Йод технический, марка А	2060	6350	+4292
Бром технический, марка А	1630	4710	+3080
Бура техническая, сорт 1	1220	1132	—88
Литий хлористый	2350	8929	+6579
Железо хлорное	120	893	+773

гией, водой и химическими реагентами, соблюдение природоохранных и санитарных норм.

Обоснование перечня извлекаемых компонентов

В табл. 72 приведено сопоставление цены годового выпуска всех видов продукции, которая потенциально может быть получена из разведанных подземных вод, с годовыми затратами на ее извлечение (без затрат на добычу и транспортировку воды, ликвидацию промстоков, общезаводских расходов). Из сопоставления видно, что производство буры является убыточным. Остальные виды продукции: йод, бром, литий хлористый и хлорное железо должны быть включены в перечень извлекаемых компонентов.

Обоснование технических решений

Технические решения отдельных элементов производственного процесса проиллюстрируем расчетом по выбору конструкций магистрального трубопровода. Скорость жидкости в магистральном трубопроводе во избежание выпадения солей должна быть не ниже 1,15 м/с. Этому условию при производительности 40 000 м^3/сут удовлетворяют трубы диаметром 600 и 700 мм. Трубопровод меньшего диаметра стоит дешевле, но за счет бо́льших гидравлических сопротивлений потребует более мощных перекачивающих насосов и повышенных энергетических затрат. Сопоставление приведенных затрат для трубопроводов диаметром 600 и 700 мм приведено в табл. 73. Длина трубопровода 30 км.

Данные об единовременных затратах и потерях напора приняты в соответствии с укрупненными технико-экономическими показателями. Расчет учитывает только те статьи расходов, которые изменяются в сопоставляемых вариантах.

Таким образом, более выгодным является трубопровод диаметром 700 мм.

Таблица 73

Сравнение затрат при различных диаметрах магистрального трубопровода

Показатели	Диаметр, мм	
	600	700
Стоимость трубопровода, тыс. руб.	1924	2392
Потери напора, м. вод. ст.	165	90
Марка насосов	Д×750/240	Д×650/90
Число насосов, шт.	4	4
Стоимость насосов, тыс. руб.	188	82
Итого капиталовложений К, тыс. руб.	2112	2474
Амортизационные отчисления и текущий ремонт, тыс. руб.	273	319
Затраты электроэнергии, тыс. кВт·ч	12 045	6570
Установленная мощность, кВт	2400	1000
Затраты на электроэнергию, тыс. руб.	342	173
Итого годовые текущие издержки С	615	482
Приведенные затраты (С+0,15К) тыс. руб.	931,8	853,1

Обоснование вариантов производительности промысла

Рассматривается 3 варианта эксплуатации участка, каждый из которых предусматривает максимальную при данной технологии производительность промысла.

Вариант I — компрессорный способ эксплуатации. При глубине динамического уровня 450—500 м стоимость компрессорной добычи становится равной стоимости добычи с помощью электропогружных насосов. Допустимое понижение уровня составит при этом 400 м, что соответствует производительности водозабора 23 тыс. м³/сут. Дебит скважины составляет 1,5 тыс. м³/сут, общее число скважин с учетом резервных (10 %) — 17. Число поглощающих скважин глубиной 1000 м — 8.

Вариант II — подъем воды погружными насосами УЭЦКН-Б—700/700 с закачкой промстоков в горизонт *N* (без поддержания пластового давления). Допустимое понижение 620 м определяется технической характеристикой насоса, обеспечивающего снижение динамического уровня до глубины 700 м, и соответствует производительности промысла 35 тыс. м³/сут. Дебит скважины составляет 700 м³/сут, общее число промысловых скважин 55, число поглощающих скважин глубиной 1000 м — 13.

Вариант III — подъем воды теми же погружными насосами, но с закачкой промстоков в продуктивный горизонт. При этом затраты на захоронение промстоков повышаются, но за счет поддержания пластового давления при максимальном расчетном снижении

Таблица 74

Технико-экономические показатели разработки участка

Показатели	Варианты		
	I	II	III
Расчетное снижение динамического уровня, м	400	620	700
Производительность промысла, тыс. $м^3$/сут	23	35	40
Расчетный срок эксплуатации, лет	27,4	27,4	27,1
Среднее содержание полезных компонентов, мг/л			
йод	30	30	30
бром	250	250	250
литий	15	15	15
Запасы полезных компонентов, тыс. т			
йод	6,9	10,5	12
бром	57,5	87,5	100
литий	3,45	5,25	6
Извлечение полезных компонентов доли единиц			
йод	0,87	0,87	0,87
бром	0,85	0,85	0,85
литий	0,82	0,82	0,82
Годовой выпуск продукции в натуральном выражении, т			
йод технический марки А	220	335	383
бром технический марки А	1830	2784	3183
литий хлористый	626	953	1089
железо хлорное (раствор)	3358	5110	5840
Цена единицы продукции, руб/т			
йод	16 580	16 580	16 580
бром	1480	1480	1480
литий хлористый	8200	8200	8200
железо хлорное	153	153	153
Годовой выпуск продукции в денежном выражении, тыс. руб.			
йод	3647,6	5554,3	6350,1
бром	2708,4	4120,3	4710,8
литий хлористый	5133,2	7814,6	8929,8
железо хлорное	513,7	781,8	893,5
Итого	12 002,9	18 721,0	20 884,2
Капиталовложения в промышленное строительство, млн. руб.			
промысел	5,0	8,4	8,6
магистральный трубопровод 30 км	4,2	5,1	5,1
перерабатывающее предприятие	6,2	8,3	9,1
ликвидация промстоков	4,8	6,4	8,9
Итого	20,2	28,2	31,1

Продолжение табл. 74

Показатели	Варианты		
	I	II	III
Сопряженные капиталовложения			
жилищное строительство	4,0	5,0	5,0
долевое участие	2,0	2,0	2,0
Итого	6,0	7,0	7,0
Годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб.			
по добыче подземных вод	1 370	3 750	3 920
	3 275	5 873	6 037
„ транспортировке	1 215	1 701	1 823
„ переработке	4 620	6 468	7 161
„ захоронению промстоков	1 220	1 708	2 416
	1 860	2 604	3 606
„ возмещению затрат на геологоразведочные работы	762	1 151	1 327
Итого	9 187	14 778	16 647
	11 732	17 797	19 954
Прибыль годовая, тыс. руб.	2 816	3 943	4 237
	271	924	930
Прибыль за весь срок эксплуатации, млн. руб.	25,7	51,1	53,7
Срок окупаемости капиталовложений, лет	14	10	10

В числителе — показатель на начало эксплуатации, в знаменателе — на конец.

Таблица 75

Расчет суммарной прибыли и срока окупаемости капиталовложений для трех вариантов

Показатели	I			II			III		
	годовая прибыль	средняя прибыль за период	общая прибыль за период	годовая прибыль	средняя прибыль за период	общая прибыль за период	годовая прибыль	средняя прибыль за период	общая прибыль за период
Год эксплуатации									
1-й	2816	2953	11 265	3943	3339	16 695	4 237	3575	17 875
5-ый	1690	1329	6 645	2735	2358	11 790	2 914	2501	12 505
10-ый	986	704	3 520	1980	1678	8 390	2 088	1757	8 785
15-ый	422	346	4 290	1376	1150	14 260	1 426	1178	14 607
28-ой	270			924			930		
Суммарная прибыль			25 720			51 135			53 772
Срок окупаемости капиталовложений, лет			14			10			10

динамического уровня до глубины 700 м производительность водозабора возрастает до 40 тыс. м^3/сут. Число промысловых скважин 63, число поглощающих скважин 22.

В табл. 74 приведены основные технико-экономические показатели сопоставляемых вариантов. По критерию максимума суммарной прибыли лучшим из них является вариант III. Дальнейшее увеличение производительности промысла возможно только с применением штанговых насосов и станков-качалок. Расчеты показывают, что в этом случае стоимость добычи воды увеличивается примерно вдвое по сравнению с добычей воды погружными электронасосами, и производство в целом станет убыточным. Поэтому вариант III следует считать оптимальным, а заложенные при его расчете параметры должны быть утверждены в качестве кондиций. В табл. 75 приведен расчет прибыли за весь срок эксплуатации и срока окупаемости капиталовложений.

Часть IV

ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫЕ И ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ СССР

Глава 12

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И РЕСУРСЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОД

Характеризуя закономерности распространения подземных промышленных вод, следует прежде всего отметить, что эти воды широко распространены в пределах провинций древних докембрийских платформенных областей (Русской и Сибирской), а также провинций эпипалеозойских плит (Западно-Сибирской, Туранской и Скифской). В провинциях складчатых гидрогеологических областей подземные промышленные воды сравнительно ограниченно распространены в районах предгорных и межгорных впадин, выполненных разнообразными по литолого-фациальному составу и генетическим особенностям осадками. Кроме этого, выходы на поверхность промышленных вод обнаруживаются в районах региональных тектонических нарушений и проявлений вулканизма.

Ниже приводятся сведения общего характера о промышленных водах провинций, позволяющие оценить особенности распространения и залегания этих вод в связи с изучением и оценкой их ресурсов. Анализ такого материала позволяет выявить как некоторые общие закономерности распространения промышленных вод в отдельных районах провинций, так и их существенные отличия [2].

Провинция подземных промышленных вод *Русской платформы* целиком входит в состав Восточно-Европейской артезианской области. Геологическое строение платформенной артезианской области двухъярусное. В основании лежит докембрийский складчатый фундамент, представленный кристаллическими метаморфизованными и изверженными породами. Геологическая история платформы характеризовалась накоплением мощной толщи осадочных терригенных и карбонатных отложений протерозойского, палеозойского, мезозойского и кайнозойского возрастов. В глубоких впадинах фундамента мощность платформенного чехла достигает 1—6 км. В связи с неодинаковым литологическим составом осадочных отложений, которые обладают значительной пористостью, проницаемостью и трещиноватостью, породы платформенного чехла аккумулируют значительные запасы подземных вод различного состава и минерализации. В различных районах (бассейнах) провинции в толще осадочных отложений прослеживаются в той или

Таблица 76

Подземные йодо-бромные воды Русской платформы

Бассейн	Минерализация промышленных вод, г/л	Концентрация, мг/л	
		I	Br
Волго-Камский	150—300	10—20	500—2000
Печорский	120—260	5—20	600—900
Московский	50—270	2—19	250—1000
Прибалтийский	10—182	1—8	10—780
Днепровско-Донецкий	150—320	1—80	300—2500
Причерноморский	18—90	5—26	60—300

иной степени регионально выдержанные по площади водоносные и водоупорные горизонты и комплексы.

Распространение подземных промышленных вод установлено в пределах бассейнов: Волго-Камского, Печорского, Московского, Прибалтийского, Днепровско-Донецкого, Причерноморского. В табл. 76 приведены некоторые сведения, характеризующие подземные йодо-бромные воды этих бассейнов. Наиболее крупным районом распространения промышленных вод является Волго-Камский бассейн [2]. Промышленные воды связаны здесь с выдержанными по всей территории бассейна водоносными комплексами терригенных отложений нижнего карбона и верхнего и среднего девона, а также с карбонатными породами палеозойского возраста. Общей закономерностью является нарастание минерализации подземных вод во впадинах и опреснение их в верхней части разреза палеозойских отложений в пределах крупных тектонических поднятий (сводов).

В целом промышленные воды провинции Русской платформы преимущественно однотипны по химическому составу: хлоридные натриевые и хлоридные кальциево-натриевые рассолы. Последние выполняют крупные впадины докембрийского платформенного основания и наиболее широко распространены в восточной части провинции на территории Волго-Камского артезианского бассейна. Подземные воды с промышленными концентрациями брома (реже йода) имеют общую минерализацию 100—320 г/л. Отмечается четкая зависимость концентраций брома от величины минерализации подземных вод. В глубоких частях крупных артезианских бассейнов имеет место параллельный рост концентраций брома и хлоридов кальция с глубиной при практически незначительном колебании общей минерализации рассолов.

При наличии в разрезе осадочных отложений соленосных пород тип подземных вод изменяется. В частности, при выщелачивании этих пород формируются хлоридные натриевые воды и рассолы, концентрации йода и брома в которых обычно ничтожны. В подсолевых отложениях часто распространены концентрирован-

ные рассолы хлоридного натриево-кальциевого, а также кальциево-магниевого состава. В подсолевой карбонатной и терригенной толщах верхнего девона на большей части Припятской впадины преобладают рассолы с минерализацией более 300—400 г/л [2]. Концентрации Br в этих рассолах достигают 1000—5800 мг/л, а I — 80—155 мг/л; наряду с этим в рассолах Припятской впадины установлено наличие K 1000—2000 мг/л и Sr 1000—1100 мг/л.

Относительно слабоминерализованные промышленные воды (18—90 г/л) распространены в меловых отложениях Причерноморского бассейна. Отличительной их чертой является сравнительная обогащенность йодом до 20—26 мг/л, при обычных для хлоридных натриевых вод такой минерализации концентрация брома 60—300 мг/л.

В провинции Русской платформы формируются крупные месторождения подземных промышленных вод, около 30 % которых концентрируется в пределах Волго-Камского артезианского бассейна.

Провинция подземных промышленных вод *Прикаспийской синеклизы* в геолого-структурном отношении приурочена к глубокой впадине с докембрийским складчатым фундаментом, выполненной осадками палеозойского, мезозойского и кайнозойского возрастов. Характерно наличие мощной толщи каменной соли и большого числа соляных куполов, которые прорывают отложения мезо-кайнозоя. В гидрогеологическом отношении впадина представляет собой сложно построенный артезианский бассейн, в котором выделяются два гидрогеологических этажа: подсолевой и надсолевой. Замкнутый характер Прикаспийской впадины, длительные процессы прогибания и мощного осадконакопления, слабый дренаж определили в целом застойный характер подземных вод бассейна и их сравнительно высокую минерализацию.

В мощной толще песчано-глинистых меловых, юрских и триасовых отложений распространены воды разнообразной минерализации, которая возрастает от северной и северо-восточной окраин к центральной части бассейна до 250—270 г/л. Имеет место четко выраженный рост минерализации в разрезе указанных отложений сверху вниз. Минерализованные воды и рассолы имеют преимущественно хлоридный натриевый состав. Концентрация йода в них достигает 10—15 мг/л, а брома — до 350—400 г/л. По геохимическому облику эти воды ничем не отличаются от подземных вод каменноугольных и девонских отложений прилегающих районов Волго-Камского бассейна.

В пределах провинции *Сибирской платформы* (Восточно-Сибирская платформенная область) складчатый архейско-протерозойский фундамент выходит на поверхность только по ее окраинам, на территории Анабарской и Алданской антеклиз, западного и южного обрамления платформы. Большая часть территории покрыта мощным (до 3—7 км) чехлом осадочных пород, выполняющих платформенные впадины — Ангаро-Ленскую, Тунгусскую и Вилюйскую синеклизы, Приверхоянский и Оленекский прогибы.

Характерной особенностью геологического развития платформы является наличие магматизма, очень широко развивавшегося в триасовое время.

В гидрогеологическом отношении территория Сибирской платформы изучена пока слабо. Исключение составляют южная и, в меньшей степени, восточная часть Ангаро-Ленского бассейна, а также верхняя часть разреза в центральных районах Вилюйской синеклизы и Якутского артезианского бассейна [38, 39].

В пределах Ангаро-Ленского бассейна в толще осадочных пород выделено одиннадцать в той или иной мере выдержанных водоносных комплексов. В верхней, надсоленосной части разреза, представленной отложениями до верхнего и среднего кембрия включительно, минерализация подземных вод изменяется от 1 до 300 г/л, а состав — от гидрокарбонатного кальциевого до хлоридного натриевого; промышленных концентраций йода, брома и редких металлов не содержится. Соленосная толща, представленная известняково-доломитовыми и галогенно-сульфатными отложениями ангарской, булайской, бельской и усольской свит нижнего кембрия, в целом играет роль регионально выдержанного водоупора. Однако в самом водоупоре установлены концентрированные рассолы, приуроченные к прослоям трещиноватых доломитов.

Наибольший интерес в отношении промышленных вод представляет нижний (подсоленосный) комплекс, приуроченный к терригенным и терригенно-карбонатным формациям нижнего кембрия — позднего докембрия. В данном комплексе заключено несколько выдержанных рассолоносных горизонтов, связанных с песчаниками парфеновского марковского, безымянного, боханского прослоев. Наиболее выдержан из них парфеновский горизонт. Рассолы подсоленосного комплекса имеют минерализацию 320—440 г/л, хлоридный кальциевый, натриево-кальциевый или кальциево-натриевый состав [2, 13]. Среднее содержание Br — около 5 г/л, K — порядка 5 г/л; присутствуют Sr — до 3 г/л, B — 27 мг/л, I—5 мг/л.

В терригенных отложениях мезозоя — верхнего палеозоя Якутского артезианского бассейна встречены хлоридные натриевые воды с минерализаций 126 г/л и содержанием Br 110—112 мг/л и I 5—8 мг/л. В крайних западной и юго-восточной окраинах этого бассейна в силурийских и ордовикских отложениях вскрыты воды минерализацией до 92 г/л и концентрациями Br — до 544 мг/л и I — до 1,5 мг/л. В отложениях верхнего и среднего кембрия обнаружены рассолы хлоридного магниево-натриево-кальциевого состава с содержанием Br 500—750 мг/л, но с ничтожными концентрациями йода. Наконец, в отложениях нижнего кембрия и верхнего протерозоя встречены рассолы с содержанием Br до 7,9 г/л [2].

Подземные воды провинции *Западно-Сибирской плиты* приурочены к осадочным отложениям мезо-кайнозойского платформенного чехла и верхней трещиноватой зоне палеозойского фундамента. Особенности геологического строения платформы и литолого-фациального состава пород определяют невыдержанность в раз-

резе осадочных отложений и по площади бассейна песчаных водоносных пластов и некоторую условность гидрогеологического расчленения разреза. По условиям питания, разгрузки, химическому составу подземных вод и характеру связи их с поверхностными водами артезианский бассейн разделяется на два гидрогеологических этажа. Границей между ними являются почти повсеместно распространенные водоупорные отложения палеогенных глин чеганской свиты.

В состав верхнего гидрогеологического этажа входят континентальные песчано-глинистые отложения четвертичного, неогенового и палеогенового возрастов. Харакатерной особенностью верхнего гидрогеологического этажа является сравнительно высокая проницаемость и незначительная плотность водоносных пород. В зависимости от стратиграфической и литологической приуроченности в породах верхнего этажа выделяют несколько водоносных горизонтов. Тесная гидравлическая связь подземных вод верхнего гидрогеологического этажа с поверхностными водами обусловила значительное опреснение подземных вод и практически полное отсутствие в них промышленных элементов. Нижний гидрогеологический этаж включает четыре водоносных комплекса, разделенных региональными водоупорными толщами. Промышленные подземные воды мезозойских отложений рассматриваемой провинции имеют некоторые особенности.

Для большей части подземных вод апт-сеноманского водоносного комплекса характерна относительно невысокая минерализация — от долей грамма в периферийных районах бассейна до 20 г/л в центре. Воды минерализацией более 5 г/л имеют преимущественно хлоридный натриевый состав и характеризуются почти полным отсутствием сульфатов. Лишь у северо-восточных склонов Казахского нагорья развиты воды с минерализацией до 10 г/л, состав которых сульфатный натриевый (содержание сульфатов достигает 1000 мг/л).

Подземные воды неокомских отложений заключены в мощной толще песчано-глинистых отложений верхнего валанжина, готерива и баррема, повсеместно распространенных на территории платформы. Водоносные породы характеризуются значительной фациальной изменчивостью. Приуроченные к ним подземные воды имеют повышенную, относительно вышележащего комплекса, минерализацию. Максимальная ее величина равна 26,8 г/л. Пресные и слабосолоноватые воды юго-восточной, восточной и северо-западной окраин характеризуются хлоридио-гидрокарбонатным натриевым, гидрокарбонатно-хлоридиым натриевым и гидрокарбонатно-хлоридным кальциево-натриевым составом.

Мощность водоносного комплекса юрских отложений изменчива и в краевых частях достигает нескольких десятков метров, в центральных она составляет 300—450 м. Глубины залегания кровли водоносных пород изменяются в широких пределах, от выхода на дневную поверхность в обрамлении низменности до 300—3500 м в северной части бассейна.

Химический состав подземных вод обнаруживает закономерное изменение от обрамления низменности к ее центру. Распространение гидрокарбонатно-хлоридных натриевых вод с минерализацией до 10 г/л фиксируется вдоль восточного, западного и южного бортов бассейна. С погружением фундамента минерализация подземных вод увеличивается, в химическом составе увеличивается содержание хлоридов натрия. Воды с минерализацией более 25 г/л развиты на довольно обширной территории в юго-восточной части бассейна. В пределах остальной территории бассейна преимущественно распространены воды с минерализацией 10—25 г/л хлоридного натриевого состава. Лишь в Тюменско-Петропавловском и Омском районах в водах такой минерализации увеличивается содержание хлоридов кальция. Максимальная величина минерализации подземных вод составляет 55 г/л.

Несмотря на различия в гидрогеологических условиях отдельных районов Западной Сибири, существуют и общие для всего бассейна закономерности изменения химического состава подземных вод. В первую очередь к таким закономерностям относится постепенное увеличение минерализации подземных вод по мере удаления от областей питания к центру бассейна, наблюдаемое в каждом из водоносных комплексов. При этом скорость нарастания минерализации вдоль потока подземных вод от обрамления к центру бассейна неодинакова. Так, минерализация от восточного и южного бортов к центру нарастает быстрее, чем от западного, а от южного — быстрее, чем от восточного. Кроме того, отчетливо фиксируется уменьшение площади распространения вод повышенной минерализации от нижних комплексов к верхним [2, 32].

В геологическом строении провинции *Скифской плиты* принимают участие породы от палеозоя до современных отложений включительно. На территории собственно эпигерцинской платформы складчатый фундамент представлен верхним палеозоем и лежит на глубинах от 2 до 10 км. Фундамент перекрыт мощной толщей мезо-кайнозойских отложений и вскрывается лишь отдельными буровыми скважинами. Промышленные воды в пределах этой провинции установлены в разрезе от юрских до понт-меотических отложений включительно.

В гидрогеологическом отношении территория Северного Кавказа представляет собой единую водонапорную систему сложного строения. По геолого-структурному принципу она разделяется на 11 гидрогеологических районов (бассейнов), каждый из которых характеризуется специфическими условиями формирования подземных вод. Практический интерес представляют два бассейна — Азово-Кубанский и Восточно-Предкавказский [2].

Подземные воды всех водоносных комплексов имеют большие гидростатические напоры и самоизливаются из скважин на большей части территории. Дебиты источников и буровых скважин колеблются от десятых долей до десятков тысяч метров кубических в сутки, в зависимости от степени уплотнения пород и их

тектонической раздробленности. Среди подземных вод преобладают воды хлоридного натриевого состава с минерализацией от 10—85 г/л в верхних водоносных комплексах до 170—400 г/л в нижних [2]. Хлоридные кальциево-натриевые обычно высококонцентрированные рассолы с минерализацией от 70 до 135 и даже 333—441 г/л установлены на наиболее погруженных участках юрского и реже нижнемелового комплексов. Подземные воды смешанного состава — хлоридно-гидрокарбонатного натриевого, гидрокарбонатного натриевого, хлоридно-сульфатного натриевого и сульфатного натриевого — отмечены в неширокой полосе, прилегающей к выходам пород комплекса на поверхность.

Для отложений мезо-кайнозоя содержание йода, брома и бора колеблется в одних и тех же пределах, в среднем для I — до 30—50 мг/л, для Br — до 100 в кайнозойских и до 300—400 мг/л в мезозойских водоносных комплексах, и для борного ангидрита — до 400 мг/л. Содержание калия достигает максимума 2000—2200 мг/л в подземных водах палеогена, затем снижается до 1500 мг/л вниз по разрезу и до 100—130 мг/л — вверх.

В провинции *Туранской плиты* платформенный чехол в нижней части представлен обычно терригенными породами пермо-триаса и нижней юры, в верхней — терригенно-карбонатными породами верхней юры, мела, третичного и четвертичного возрастов. Структура складчатого основания отличается большой сложностью и включает ряд положительных и отрицательных элементов. К наиболее крупным отрицательным структурам относятся Чуйская, Сырдарьинская и Амударьинская впадины, Тургайский прогиб, а также система прогибов на территории Устюрта и Мангышлака. Среди положительных элементов выделяются Мангышлакская мегантиклиналь, поднятия Туаркыра, Устюрта, Султан-Уиз-Дага, сводовое поднятие Кызылкумов и др.

В пределах Тургайского, Чу-Сарысуйского и Сырдарьинского артезианских бассейнов развиты в основном подземные воды с пониженной минерализацией от пресных до солоноватых и горько-соленых. Концентрации йода и брома в этих водах незначительны и промышленного интереса не представляют. В Устюртской системе (Северо-Устюртский, Бузачинский) бассейнов в верхней, надпалеогеновой части разреза также развиты подземные воды с пониженной минерализацией и незначительными концентрациями йода и брома. В нижней, подпалеогеновой части разреза в отложениях верхнего мела, неоком-апта, юры и пермо-триаса минерализация подземных вод возрастает до нескольких сотен граммов на литр, а по составу они хлоридные натриевые [2]. Наиболее минерализованные воды вскрыты в пределах впадин, в стороны поднятий минерализация уменьшается до 32—8 г/л. Концентрация йода в этих водах обычно не превышает 15—20 мг/л, максимальные их значения зафиксированы в водоносных комплексах юры — до 35 мг/л и пермо-триасе — до 26,5 мг/л. К водам этих же отложений приурочены и максимальные концентрации брома, соответственно, до 645 и 408,7 мг/л.

Подземные воды Южно-Мангышлакского бассейна изучены слабо. По имеющимся данным, в разрезе осадочной толщи выделяется два гидрогеологических этажа, разделенных водоупорной толщей верхнепалеогеновых глин. К верхнему гидрогеологическому этажу приурочены преимущественно сульфатные натриевые и сульфатно-хлоридные натриевые воды с минерализацией 3—16 г/л. Минерализация подземных вод возрастает по направлению к побережью Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол. Нижний, подпалеогеновый гидрогеологический этаж содержит напорные хлоридные натриевые воды с минерализацией от 20 до 170 г/л и концентрациями I 1—13 мг/л и Br 30—422 мг/л.

В пределах Амударьинского бассейна в неоген-четвертичных, эоценовых и сенон-плиоценовых отложениях заключены сравнительно слабоминерализованные воды, химический состав которых определяется во многом условиями питания, интенсивностью процессов выщелачивания и континентального засоления. В общем случае химический состав этих вод изменяется от гидрокарбонатного кальциевого (при минерализации до 1 г/л) до хлоридного натриевого с минерализацией 50 г/л; в отложениях эоцена и сенон-палеоцена распространены преимущественно хлоридно-сульфатные натриевые и хлоридные натриевые воды с минерализацией, соответственно, 3—18 г/л и иногда до 60 г/л [2, 12].

В турон-сеноманских, альбских и неоком-аптских отложениях минерализация подземных вод возрастает в западном и северо-западном направлениях до 200 г/л. В этом же направлении увеличиваются концентрации Br, от 100—200 до 400 мг/л (Курганчикская и Нуругурская площади) и I до 26—38 мг/л. Химический состав и минерализация подземных вод довольно тесно увязываются с их динамикой, минерализация подземных вод возрастает от южных, восточных и северо-восточных границ бассейна в северо-западном направлении, т. е. вдоль по потоку подземных вод, причем в составе последних заметную роль приобретают хлориды кальция.

Для гидрогеологических складчатых областей характерна приуроченность подземных промышленных вод к толщам осадочных отложений в пределах межгорных и предгорных впадин. Вне этих впадин массивы, сложенные в различной степени метаморфизованными и собранными в складки горными породами, насыщены преимущественно пресными, а в зонах дизъюнктивных нарушений иногда минеральными и термальными водами и бесперспективны для поисков промышленных йодо-бромных вод. Не всегда перспективны в этом отношении и подземные воды межгорных артезианских бассейнов.

В пределах провинции областей *альпийской* складчатости наличие промышленных йодо-бромных вод установлено в Южно-Каспийском бассейне, включающем Западно-Туркменский и Прикуринско-Апшеронский бассейны, а также в артезианском бассейне Предкарпатского прогиба [2, 12].

Западно-Туркменский артезианский бассейн приурочен к одноименной тектонической впадине и характеризуется в структурном отношении двухэтажным строением. Нижний этаж образован доплиоценовой складчатостью и сложен отложениями мезозоя и палеогена. Верхний сложен осадками плиоцен-четвертичного возраста значительной мощности. Наиболее водообильным является водоносный комплекс отложений красноцветной толщи, повсеместно распространенный и представленный переслаиванием песков, алевролитов, алевритов, песчаников, глин и глинистых сланцев суммарной мощностью 1000—3000 м.

Подземные воды верхнекрасноцветного водоносного комплекса преимущественно хлоридного натриевого состава. На преобладающей части территории бассейна распространены воды с минерализацией 90—140 г/л, реже 30—90, практически бессульфатные с эквивалентным содержанием хлоридов кальция 12—15 %-э. В краевой северо-восточной части бассейна (восточная группа поднятий Прибалханской зоны, Челекен, Гограньдаг-Карадашлинская группа поднятий) развиты высокоминерализованные воды 150—300 г/л с повышенным эквивалентным содержанием кальция до 16—24 %. Содержание I в подземных водах комплекса изменяется от 20 до 74 мг/л, Br от 140 до 592 мг/л, B 20—264 мг/л. Нижнекрасноцветный водоносный комплекс залегает на глубинах от 1000—3000 м в пределах структурных поднятий до 300—4500 м в пределах прогиба. Подземные воды нижнекрасноцветного водоносного комплекса характеризуются большей пестротой химического состава и меньшей минерализацией по сравнению с верхнекрасноцветным комплексом. Наиболее высокоминерализованные воды (50—205 г/л) также приурочены к восточным структурам Прибалханской зоны и Гограньдаг-Карадашлинской группе складок; в западной и южной частях бассейна развиты наименее минерализованные (11—50 г/л) воды хлоридного натриевого состава с повышенным эквивалентным содержанием (до 5—9 %) гидрокарбонатов. Содержание I в воде колеблется от 19 до 49 мг/л при наиболее часто встречающихся значениях 25—35 мг/л; Br содержится в количестве 23—200 мг/л [2].

Нижний гидрогеологический этаж включает водоносные и водоупорные комплексы меловых и юрских отложений, сведения о которых в самой впадине практически отсутствуют. Единичными скважинами в прибортовой зоне вскрыты маломинерализованные (2—10 г/л) воды в отложениях неокома и напорные термальные воды с минерализацией 17—58 г/л и содержанием I 40—65 мг/л в отложениях сеномана. В целом меловые и юрские водоносные породы в Западно-Туркменском бассейне залегают на весьма значительных глубинах.

Прикуринско-Апшеронский бассейн (или Кавказская часть Южно-Каспийской впадины) является одним из перспективных с точки зрения масштабов распространения и практического использования подземных йодо-бромных вод, изучение которых было начато здесь в 1924 г. По структурным и гидрогеоло-

гическим условиям рассматриваемая часть Южно-Каспийского бассейна подразделяется на три основных района: Апшеронский, Кобыстанский и Прикуринский. Во всех указанных районах подземные йодо-бромные воды вскрыты скважинами в отложениях среднего подъяруса апшеронского яруса и продуктивной толщи. При этом подземные воды среднего подъяруса апшерона охарактеризованы подробно только в пределах Прикуринского района, где они встречаются скважинами на глубинах 600—1200 м. Подземные воды среднеапшеронских отложений относятся к хлоридным натриевым и хлоридным кальциево-натриевым, минерализация их разнообразна, от 20 до 60 г/л (иногда до 120 г/л). Содержание I изменяется от 30 до 50 мг/л, Br— от 40 до 220 мг/л.

Подземные воды продуктивной толщи (верхнего отдела) характеризуются некоторым разнообразием, что объясняется отличиями в геологическом строении и условиях залегания водоносных отложений в различных районах Азербайджанской ССР. В Прикуринском районе минерализация подземных вод изменяется от 20 и 200 г/л, концентрация I от 20 до 50 мг/л и Br — от 60 до 340 мг/л. В Кобыстанском районе распространены несколько менее минерализованные воды (10—100 г/л), содержание I в количестве 15—40 мг/л и Br — не более 200 мг/л. На апшеронском полуострове минерализация подземных вод верхнего отдела продуктивной толщи колеблется от 20 до 150 г/л, а концентрация I и Br соответственно от 10—20 до 30 мг/л и от 30—40 до 240 мг/л. В водах присутствуют B в количестве от 75 до 275 мг/л, K от 350 до 1200 мг/л [2].

В пределах Предкарпатского артезианского бассейна подземные воды, содержащие повышенные концентрации йода и брома, заключены в трех водоносных комплексах: нижнесарматском, верхнемеловом и нижнеюрском. Вследствие ограниченных запасов подземных промышленных вод и низкой водообильности пород ни один из перечисленных водоносных комплексов по имеющимся в настоящее время данным не может рассматриваться как перспективная гидроминеральная сырьевая база.

В провинции областей *палеозойской* (герцинской и каледонской) складчатости, охватывающих часть территории страны, распространение подземных промышленных вод весьма ограничено и связано главным образом с крупными межгорными впадинами: Ферганской и Сурхандарьинской.

В толще слагающих Ферганский артезианский бассейн пород подземные воды приурочены к песчаникам в окраинных частях бассейна, замещаемых в центральных районах глинами и алевролитами. Минерализация вод, характеризующихся хлоридным кальциево-натриевым составом, колеблется в зависимости от глубины их вскрытия от 40 до 110 г/л, содержание I достигает 20—35 мг/л, а Br — до 50 мг/л [2, 12]. В пределах Сурхан-Дарьинского бассейна выделено 5 водоносных комплексов, имеющих сплошное распространение и повсеместно заключающих напорные воды, общие сведения о которых приведены в табл. 77.

Таблица 77

Промышленные воды Сурхандарьинского артезианского бассейна на глубине 500—2000 м

Водоносный комплекс	Минерализация воды, г/л	Концентрация, мг/л	
		I	Br
Алайский	8,0—38,7	до 30	до 94,7
Сенон-палеоценовый	37,7—146,3	7—28,7	242—849
Альб-сеноман-туронский	20,3—188,4	4—20	200- 491

В пределах провинции *кайнозойской складчатости* на территории СССР распространение подземных йодо-бромных вод установлено лишь в артезианских бассейнах о. Сахалина. Известно также, что на базе подземных вод кайнозойских артезианских бассейнов в Японии интенсивно развивается промышленная добыча йода, концентрации которого в пластовых водах превышают в некоторых случаях 100 мг/л.

Северо-Сахалинский бассейн выполнен мощной (в локальных прогибах до 8—9 км) толщей осадочных отложений в основном неогенового (частично мелового) возраста. Подземные воды неогеновых отложений характеризуются сравнительно низкой минерализацией (10—58 г/л) и преимущественно хлоридным натриевым (реже гидрокарбонатным хлоридно-натриевым) составом [2, 12]. Концентрации йода в этих водах изменяются в широких пределах, от единиц до 80—104 мг/л. Наряду с йодом в водах обнаружен Br в количестве от 1 до 150 мг/л, B — от 1 до 120 мг/л. Татарский адартезианский бассейн приурочен к одноименному прогибу, вытянутому вдоль западного побережья острова в его центральной и южной частях. В пределах бассейна распространены неогеновые, палеогеновые и меловые отложения; мощность только неогеновых и палеогеновых отложений достигает 8000 м.

К плиоценовым отложениям бассейна приурочены воды преимущественно с минерализацией 17—18 г/л, содержанием I до 19 мг/л, Br до 70 мг/л и B до 88 мг/л. Водоносный комплекс миоценовых отложений характеризуется слабой водообильностью и по немногочисленным данным заключает хлоридные и гидрокарбонатно-хлоридные воды сравнительно невысокой минерализации (до 8—17 г/л), с концентрациями I 4—8 мг/л, Br 12—15 мг/л и B до 90 мг/л. В зонах интенсивной трещиноватости пород развиты пресные и слабоминерализованные воды. В палеогеновых и меловых отложениях подземные воды изучены слабо. По имеющимся данным, эти воды хлоридного натриевого состава и характеризуются повышенной минерализацией (12—30 г/л), концентрации I в отдельных случаях достигают 40 мл/л, а содержания Br равны 6—15 мг/л [2, 12]. Породы комплекса, представленные песчаниками, алевролитами, аргиллитами с прослоями галечников,

обладают весьма низкими фильтрационными свойствами, что определяет бесперспективность использования приуроченных к ним подземных вод в целях промышленного извлечения йода и брома.

Бассейн Лютогской впадины изучен недостаточно. Подземные йодо-бромные воды вскрыты здесь в отложениях невельской свиты, характеризующихся в целом слабой водопроницаемостью и невысокой водообильностью. К этим отложениям приурочены подземные воды хлоридного натриевого типа с повышенным содержанием гидрокарбонатов, минерализация вод в большинстве случаев равна 10—20 г/л, концентрации I колеблются от 10 до 60 мг/л, а содержание Br — от 10 до 100 мг/л. В настоящее время для оценки перспектив использования этих вод в пределах бассейна проводятся специальные поисково-разведочные работы. Имеются сведения о наличии подземных йодо-бромных вод в других районах о. Сахалина. Например, в Пограничном бассейне, приуроченном к альпийскому грабену на восточном побережье острова, в отложениях борской свиты миоцена вскрыты хлоридные натриевые минерализованные (15—20 г/л) воды с концентрациями I до 70—100 мг/л. Не исключена возможность наличия йодо-бромных вод в меловых отложениях весьма слабо изученного Поронайского артезианского бассейна.

Таким образом, в глубоких водоносных горизонтах артезианских бассейнов о. Сахалина широко распространены воды с повышенными концентрациями йода и некоторых других компонентов. Однако их промышленная ценность в настоящее время не может быть установлена из-за слабой изученности водовмещающих пород.

Краткий обзор распространения подземных промышленных вод на территории СССР подтверждает многообразие условий их залегания в пределах отдельных гидрогеологических провинций и районов. Вместе с тем, распространение промышленных (и в частности йодо-бромных) вод подчиняется некоторым закономерностям. Для крупных артезианских бассейнов древних платформенных областей характерной общей закономерностью является рост минерализации подземных вод по мере увеличения глубин залегания водоносных горизонтов. В пределах одного и того же бассейна содержание брома, стронция и некоторых других компонентов увеличивается в основном параллельно росту минерализации подземных вод и пропорционально содержанию хлоридов кальция. Максимальные концентрации брома, стронция, калия установлены в пределах бассейнов, характеризующихся наличием соленосных формаций. Для этих районов характерно широкое развитие в основном бромных, реже йодо-бромных минерализованных вод и рассолов, в некоторых случаях в этих водах в значительных количествах обнаруживаются стронций, цезий, калий и др.

В более молодых эпигерцинских платформенных и горно-складчатых областях часто распространены сравнительно слабоминерализованные воды [32]. В некоторых случаях отмечается снижение минерализации вод с глубиной или чередованием в раз-

резе пород вод высокой и пониженной минерализации, что увязывается обычно с особенностями залегания и условиями движения подземных вод в различных водоносных комплексах и горизонтах. В таких областях преимущественно распространены йодные и йодно-бромные иногда цезиеносные воды; бороносные воды встречаются чаще всего в пределах альпийской складчатой области.

Глава 13
ПРОГНОЗНЫЕ РЕСУРСЫ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАПАСЫ ОСНОВНЫХ ТИПОВ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД СССР

ПРОВИНЦИЯ ХЛОРИДНЫХ НАТРИЕВЫХ (КАЛЬЦИЕВЫХ) ПРЕИМУЩЕСТВЕННО МЕТАНОВЫХ И АЗОТНО-МЕТАНОВЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Эти воды приурочены к осадочному чехлу платформ, предгорных прогибов, некоторых межгорных впадин складчатых областей (преимущественно к глубоким их частям) и имеют исключительно пластовый характер. Минерализация их весьма разнообразна — от соленых до сверхкрепких рассолов, температура тоже — от сверххолодных до сверхгорячих. Основная масса вод этой провинции хлоридного натриевого состава, в глубоких зонах бассейнов — хлоридного кальциево-натриевого и хлоридного кальциевого, характерны высокие содержания йода и брома, что во многих случаях позволяет осуществлять их промышленную добычу [2]. Такое содержание существенно превышает нижние пределы, установленные для лечебных вод. В газовом составе вод провинции преобладает метан, а в ряде структур имеются скопления жидких и газообразных углеводородов.

В первой провинции выделяется несколько платформенных областей, каждая из которых, кроме того, подразделяется на ряд гидрогеологических районов, соответствующих крупным артезианским бассейнам. Небольшое число таких районов приурочено к межгорным бассейнам в горно-складчатых областях.

Платформенные гидрогеологические области

В *Восточно-Европейской области* повсеместно распространены рассолы палеозойских карбонатных и терригенных отложений. Наибольшие ресурсы минеральных вод с высокими содержаниями брома или одновременно йода и брома сосредоточены в Восточно-Русском районе. Дебиты скважин сильно изменяются, некоторые скважины фонтанируют. Чаще всего удельные дебиты скважин не превышают 5—6 м³/сут/м. В Прибалтийском бассейне развиты бромные рассолы в нижнепалеозойских отложениях. Вследствие невысоких коллекторских и фильтрационных свойств пород ресурсы подземных вод здесь ограничены, хотя, безусловно, представ-

ляют интерес для бальнеолечения. Рассолы с высокими концентрациями йода и брома почти повсеместно распространены в Днепровско-Донецкой впадине, где они приурочены к отложениям перми, карбона и девона. Вследствие низких фильтрационных свойств пород эксплуатационные ресурсы ограничены. Высококонцентрированные рассолы развиты в Прикаспийской впадине. В связи с низкими фильтрационными свойствами пород ресурсы подземных вод невелики. В Причерноморской впадине зафиксированы слабые йодо-бромные рассолы, при этом характерны существенно повышенные содержания йода и относительно невысокие — брома. Связаны они с неравномерно водообильными горизонтами верхнего мела и дат-палеоцена, общие ресурсы сравнительно невелики.

Большеземельская область. Перспективы эксплуатации этих вод здесь благоприятные вследствие достаточно хороших фильтрационных свойств пород и значительных запасов воды.

Скифская область характеризуется значительными эксплуатационными ресурсами и широким распространением йодных и йодо-бромных вод.

В *Туранской* области также широко развиты йодо-бромные рассолы в меловых и юрских отложениях чехла. В Устюртском, Центрально-Каспийском и Тургайском районах водоносные горизонты маловодообильны и эксплуатационные ресурсы этого типа вод здесь незначительны. В Амударьинском бассейне сосредоточены значительные прогнозные ресурсы йодо-бромных вод, связанные с высокими концентрациями йода и брома и с хорошими коллекторскими свойствами пород.

В *Западно-Сибирской* области сосредоточены весьма значительные эксплуатационные ресурсы йодо-бромных термальных вод. Основные ресурсы подземных вод (минеральных, термальных и промышленных) сосредоточены в неокомских отложениях, имеющих хорошие коллекторские и фильтрационные свойства.

Восточно-Сибирская область наименее равномерно изучена. По имеющимся данным, здесь повсеместно в палеозойских отложениях чехла развиты бромные рассолы, в том числе и промышленные, нередко сероводородные. Наиболее изучены они в Ангаро-Ленском бассейне, где сосредоточены значительные ресурсы этих рассолов, при благоприятных гидрогеологических условиях являющихся также и промышленными. Из других бассейнов этой области единичные данные свидетельствуют о наличии аналогичных рассолов в Якутском и Тунгусском бассейнах, хотя сведений для достоверной оценки прогнозных ресурсов здесь недостаточно.

Складчатые гидрогеологические области

В складчатых областях районы распространения хлоридных натриевых или хлоридных кальцево-натриевых рассолов ограничены и приурочены к межгорным впадинам или предгорным прогибам. Крупнейшие из этих районов — Прикуринский (Кавказская

область), Западно-Туркменский и Предкопетдагский (Копетдаг-Большебалханская область), Центрально-Казахстанский и некоторые другие. Наиболее значительными ресурсами рассолов обладают Прикуринский и Западно-Туркменский бассейны, являющиеся частями Южно-Каспийской впадины с аналогичными гидрогеологическими условиями [2]. Рассолы (до 200—300 г/л) йодо-бромные, высокотермальные, приурочены к плиоценовым отложениям. Почти повсеместно эти рассолы представляют интерес одновременно как минеральные лечебные и промышленные. Удельные дебиты самоизливающих скважин нередко достигают 100 м³/сут/м, при преобладающих значениях 5—20 м³/сут/м. В Предкопетдагском прогибе развиты йодные воды с невысокой минерализацией (до 25 г/л) и высокими концентрациями йода (до 262 и даже 400 мг/л) в меловых отложениях. Однако эксплуатационные ресурсы их здесь невелики вследствие локального распространения и низкой водообильности горизонтов.

Йодо-бромные воды встречены также в глубоких зонах Ферганского, Сурхандарьинского и Иссык-Кульского бассейнов, Джунгаро-Тянь-Шаньско-Памирской складчатой области, Кузнецкого и Минусинского бассейнов Саяно-Алтайской области, в бассейнах о. Сахалин, в наложенных впадинах Центрально-Казахстанской области. Ресурсы подземных вод во всех этих впадинах, по-видимому, сравнительно невелики, однако в связи с высоким содержанием йода и брома они могут представлять интерес как минеральные, особенно в сочетании с другими типами минеральных вод, обычно встречающимися здесь (например, углекислых или азотных терм).

Минеральные воды провинции используются в настоящее время преимущественно в пределах Европейской части СССР (Вологда, Усть-Качка, Краснодарский край и др.), незначительно — в Западной Сибири (Тюмень). В большинстве других районов они используются очень мало, хотя ресурсы йодо-бромных, йодных и бромных вод во многих районах огромные.

ПРОВИНЦИЯ УГЛЕКИСЛЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Провинция углекислых минеральных вод охватывает территорию горноскладчатых сооружений СССР, включая Карпаты, Кавказ, Памир, Тянь-Шань, Восточные Саяны, Прибайкалье, Забайкалье, Приморье, Чукотку, Камчатку.

Углекислые воды связаны преимущественно со складчатыми сооружениями альпийского возраста, или с палеозойскими и мезозойскими сооружениями, омоложенными в альпийский тектономагматический цикл. Этим обусловлены разнообразие и сложность геолого-структурных и гидрогеологических условий провинции. В этой провинции преобладают трещинные воды массивов кристаллических пород и трещинно-жильные воды. Кроме того, развиты трещинно-пластовые или порово-пластовые воды в наложенных или межгорных впадинах. Во всех случаях общим

условием формирования углекислых вод является внедрение глубинной углекислоты преимущественно термометаморфического генезиса в верхние горизонты земной коры, где происходит насыщение ею подземных вод. Углекислые минеральные воды названы по основному специфическому компоненту, оказывающему лечебное действие, хотя одновременно они могут содержать и другие газы: азот, метан, сероводород. Провинция углекислых вод подразделяется на ряд гидрогеологических складчатых областей.

Карпатская область — область холодных углекислых вод различных типов и минерализации, приуроченных в основном к складчатым сооружениям горной части Карпат, частично к Закарпатскому артезианскому бассейну. Величина прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов углекислых вод этой области оценена по естественным источникам с учетом утвержденных эксплуатационных запасов в 10 000 м^3/сут.* На месторождениях углекислых вод здесь базируется ряд санаториев.

Кавказская область включает Большой и Малый Кавказ, а также часть Предкавказья, характеризуется исключительным разнообразием типов углекислых вод в зависимости от ионного состава, температуры и специфических компонентов. Разнообразие углекислых вод Кавказской области обусловлено сложностью геолого-тектонической обстановки и ее гидрогеологического строения: сочетанием трещинных гидрогеологических массивов, адартезианских бассейнов с различными по типу наложенными бассейнами, господствующей ролью глубинного углекислого газа в формировании минеральных вод. Оценка ресурсов углекислых вод Кавказской области выполнена раздельно для следующих структурных единиц: Северный моноклинальный склон Большого Кавказа, полоса его предгорий (Минераловодский выступ), горная часть Большого Кавказа, бассейны Грузинской глыбы, Малый Кавказ.

Основные исходные данные и результаты расчета естественных и прогнозных ресурсов, а также эксплуатационных запасов всех выделенных гидрогеологических единиц Кавказской складчатой области и всех последующих областей приведены в табл. 78.

В Кавказской складчатой области на углекислых водах базируется множество санаторно-курортных комплексов всесоюзного и республиканского значения. Общие ресурсы углекислых минеральных вод этой области весьма значительны и в целом обеспечивают перспективу расширения санаторно-курортной сети. Однако следует отметить, что ряд месторождений эксплуатируется на пределе их возможностей (КМВ, Боржоми). Следовательно, в районе крупных курортов необходимы доразведка существующих и разведка новых месторождений.

---

* Запасы минеральных вод даны из «Объяснительной записки к карте прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов основных типов минеральных вод СССР масштаба 1 : 5 000 000». М., ВСЕГИНГЕО, 1984 г.

Таблица 78

Ресурсы углекислых минеральных вод и азотных терм

Гидрогеологический район	Суммарная протяженность разрывных дислокаций, м	Принятая средняя эффективная мощность дислокаций, м	Коэффициент активности	Средняя глубина вреза, м	Удельная производительность, м³/сут	Естественные ресурсы, м³/сут	Прогнозные ресурсы, м³/сут
1	2	3	4	5	6	7	8
Углекислые минеральные воды							
Карпатская область							10 000
Кавказская область							
Предкавказье и Большой Кавказ							
Северный моноклинальный склон Большого Кавказа	По родниковому стоку					189 180	56 760
Северный моноклинальный склон Большого Кавказа (полоса предгорий)						118 000	35 400
Горная часть Большого Кавказа							3 760
Малый Кавказ							
Аргветский артезианский бассейн	25 000	20	0,05	100	0,10	2 500	750
Триалетская водоносная система	240 000	20	0,05	100	0,10	24 000	7 200
Ахалкалакский артезианский бассейн	390 000	20	0,05	100	0,10	39 000	12 000
Тбилисская водоносная система	130 000	20	0,05	100	0,10	13 000	3 900
Верхне-Ахуряиская впадина	40 000	20	0,05	400	3,42	136 700	41 000
Восточный склон Джавахетского хребта	42 000	20	0,05	100	0,10	4 200	1 260
Степанаванская впадина	10 000	20	0,05	400	3,42	34 200	300
Скитакская впадина	22 500	20	0,05	300	1,79	40 500	12 100
Ленинаканская впадина	20 000	30	0,11	400	3,42	225 500	67 700
Алавердская впадина	25 000	10	0,01	100	0,185	500	250
Марнеули-Гордабанский артезианский бассейн	112 000	20	0,05	100	0,10	11 200	3 360
Апаранская впадина	15 000	20	0,05	150	0,366	5 400	1 600
Касаханская впадина	21 000	20	0,05	300	0,79	37 700	11 300
Дилижанская впадина	30 000	20	0,05	300	1,79	54 400	16 200

Продолжение табл. 78

1	2	3	4	5	6	7	8
Иджеванская впадина	35 000	10	0,01	100	0,185	650	200
Кироваканская впадина	41 000	20	0,05	300	1,79	73 800	22 100
Ереванский прогиб	30 000	30	0,11	600	5,83	577 000	173 100
Мармарикская впадина	30 000	20	0,05	100	0,185	5 600	1 700
Малый Кавказ							
Красносельская впадина	50 000	20	0,05	300	1,79	89 900	27 000
Иори-Ширакский артезианский бассейн	133 000	20	0,05	300	0,64	85 120	25 540
Араратская впадина	45 500			1000	3,4	650 000	195 000
Чатминская впадина	30 000	20	0,05	300	1,79	53 900	16 200
Впадина Камо	15 000	30	0,11	300	1,79	89 900	27 000
Мартунинская впадина	17 500	30	0,11	800	5,83	336 000	101 000
Арпинская впадина	67 500	20	0,05	200	0,76	51 400	15 400
Горисский синклинорий	7 500	10	0,01	100	0,185	140	40
Воротанские впадины	45 000	20	0,05	400	3,416	153 700	46 100
Нахичеванская межгорная депрессия	140 000	20	0,05	200	0,141	19 740	5 920
Горная часть Малого Кавказа	Определялось по родниковому стоку						12 530
Мегринская впадина	7 500	20	0,05	250	1,216	9 100	2 700
Кафанская впадина	6 000	20	0,01	100	0,185	100	30
Тяньшаньско-Памирская область							
Тянь-Шань:							
Арпинский артезианский бассейн	40 150	10	0,05	1000	2,12	425 590	127 677
Сусакский артезианский бассейн	130 710	10	0,05	1000	2,12	138 542	41 562
Саяно-Алтайская область							
Артезианский бассейн							
Центральный	130 000	10	0,011	1000	0,664	9 500	2 850
Подобасско-Тутуясский	94 000	10	0,011	350	1,303	13 570	4 040
Неня-Чумышский	6 300	10	0,011	400	0,276	2 040	610
Восточно-Сибирская область							
Артезианский бассейн							
Верхне-Тунгирский	125 000	15	0,005	—	—	—	—
				500	0,149	1400	400
Амазарский	55 000	10	0,005	—	—	—	—
				300	0,120	300	100

1	2	3	4	5	6	7	8
Верхнеамурский	525 000	10	0,005	— 500	— 0,149	— 3900	— 1200
Итакинский	200 000	15	0,005	— 500	— 0,149	— 2200	— 700
Уруша-Ольдойский	75 000	10	0,005	— 500	— 0,149	— 600	— 200
Зиловский	140 000	15	0,005	— 200	— 0,087	— 900	— 300
Средне-Нерчинский и Верхне-Нерчинский	275 000	15	0,005	— 500	— 0,149	— 3100	— 1000
Верхне-Онинский	232 000	15	0,005	50 500	0,01 0,149	200 2000	100 800
Нижне-Нерчинский	112 000	15	0,005	— 500	— 0,149	— 1200	— 400
Поперечинская впадина	100 000	15	0,005	50 500	0,01 0,140	90 1100	200 800
Артезианский бассейн							
Ульдургинский	125 000	10	0,005	—	—	—	—
Зюльзинский	75 000	15	0,005	— 500	— 0,149	— 800	— 300
Усть-Карский	112 000	10	0,005	— 500	— 0,149	— 900	— 300
Верхне-Аргунский	80 000	10	0,005	— 500	— 0,149	— 2200	— 700
Онинский	85 000	15	0,005	50 500	0,01 0,149	80 1000	30 300
Хоринский	60 000	15	0,005	50 500	0,01 0,149	60 700	20 200
Мухейский	250 000	15	0,005	100 500	0,035 0,149	650 2800	200 800
Верхне-Хилокская впадина	255 000	15	0,005	— 100	— 0,035	— 700	— 200
Артезианский бассейн							
Орховский	200 000	10	0,005	— 500	— 0,149	— 1500	— 450

1	2	3	4	5	6	7	8
Серебрянский	175 000	10	0,005	— / 500	— / 0,149	— / 1300	— / 400
Киженгино-Кудунский	212 000	15	0,005	70 / 500	0,019 / 0,149	300 / 2400	60 / 800
Иволгино-Удинский	135 000	15	0,005	100 / 400	0,035 / 0,138	400 / 1400	100 / 400
Оронгойский	250 000	15	0,005	70 / 400	0,019 / 0,138	350 / 2600	100 / 800
Хилокская впадина	375 000	15	0,005	100 / 500	0,035 / 0,149	1000 / 4200	300 / 1300
Артезианский бассейн							
Тунгино-Харанорский	175 000	10	0,005	50 / 500	0,0102 / 0,149	90 / 1300	30 / 400
Западно-Урулюнгуйский	275 000	10	0,005	50 / 300	0,0102 / 0,120	140 / 1700	40 / 500
Восточно-Урулюнгуйский	300 000	10	0,005	— / 500	— / 0,149	— / 2200	— / 700
Тугнуйская впадина	235 000	15	0,005	100 / 500	0,035 / 0,149	600 / 2600	200 / 800
Сарантуйский артезианский бассейн	250 000	15	0,005	100 / 500	0,035 / 0,149	650 / 2800	200 / 800
Борзинский артезианский бассейн	62 000	10	0,005	50 / 500	0,0102 / 0,149	30 / 500	10 / 150
Читино-Ингодинская впадина	704 000	15	0,005	— / 500	— / 0,149	— / 5800	— / 1600
Зун- и Барун-Торийские впадины	160 000	10	0,005	50 / 500	0,0102 / 0,149	80 / 1200	20 / 400
Гусиноозерский артезианский бассейн	225 000	15	0,005	100 / 500	0,035 / 0,149	600 / 2500	100 / 700
Шареидайский артезианский бассейн	87 000	15	0,005	100 / 500	0,035 / 0,149	200 / 1000	60 / 300
Среднехилокская впадина	69 000	15	0,005	100 / 500	0,035 / 0,149	200 / 800	50 / 200
Амуро-Охотская область							
Амуро-Зейский артезианский бассейн	162 500	10	0,005	— / 500	— / 0,149	— / 1200	— / 400

1	2	3	4	5	6	7	8
Сихотэ-Алинская область							
Артезианский бассейн							
Среднеамурский	600 000	10	0,005	— / 500	— / 0,149	— / 4500	— / 1300
Среднебикинский	25 000	10	0,011	300	0,12	3 960	11 900
Верхнебикинский	30 000	10	0,011	300	0,12	400	120
Алчанский	11 000	10	0,011	800	0,12	150	40
Бейцухинский	30 000	10	0,011	300	0,12	400	120
Ореховский	20 000	10	0,011	300	0,12	260	80
Гадушинский	15 000	10	0,011	300	0,12	1 980	60
Малиновский	10 000	10	0,011	300	0,12	130	40
Шетухинский	3 500	10	0,011	300	0,12	2 310	690
Приханкайский	300 000	10	0,011	300	0,12	3 960	11 900
Даубихинский	40 000	10	0,011	300	0,12	530	160
Артемо-Тавричанский	30 000	10	0,011	300	0,12	400	120
Янмутьхоузский	11 000	10	0,011	300	0,12	150	40
Сахалинская область							
Артезианский бассейн							
Северо-Сахалинский	3 000 000	10	0,03	1000	0,319	287 100	86 130
Пограничный малый горный бассейн	90 000	30	0,1	20	0,011	2 970	891
Поронайский	290 000	10	0,03	1000	0,319	27 753	8 326
Тунайчинский	115 000	30	0,1	20	0,011	3 795	1 138
Сусунайский	230 000	30	0,03	1000	0,319	66 033	19 810
Азотные термы							
Кавказская область							
Большой Кавказ							
Южный моноклинальный склон Большого Кавказа	863 000	10	0,005	500	0,58	25 030	7 500
Северный моноклинальный склон Большого Кавказа						98 640	29 600
Артезианский							
Бзыбский	71 000	20	0,05	200	0,35	24 850	7 460
Кодорский	57 000	20	0,05	100	0,10	5 700	1 710
Колхидский	77 000	20	0,05	500	1,11	85 550	25 670
Мегрельский	55 000	20	0,05	200	0,35	19 250	5 780
Гурийский	1 900	20	0,05	100	0,10	1 900	570
Цхалтубский	63 000	20	0,05	200	0,35	22 050	6 620
Аджаро-Имеретинский	212 000	20	0,05	100	0,10	21 200	6 360
Ахалцихский	19 000	20	0,05	50	0,02	380	110
Рача-Лечхумский	144 000	20	0,05	200	0,35	50 400	15 120

Продолжение табл. 78

1	2	3	4	5	6	7	8
Дзирульский	34 000	20	0,05	50	0,02	680	200
Карталинский	126 000	20	0,05	200	0,35	44 100	13 230
Алазанский	276 000	20	0,05	300	0,64	176 640	53 000
Горная часть Большого Кавказа	По родниковому стоку						137 116
Малый Кавказ							
Алазань-Авторанская депрессия	350 000	20	0,05	400	0,36	126 000	37 800
Туранская область							
Леикоранская депрессия	70 000	20	0,05	200	0,141	9 870	2 960
Сырдарьинский артезианский бассейн	1 008 000	10	0,01	1000	5,28	532 224	159 667
Бухаро-Каршинский артезианский бассейн	1 415 000	10	0,01	1000	5,28	747 120	224 136
Джунгаро-Тянь-Шаньско-Памирская область							
Чингиз-Жарминско-Балхашский район							
впадина 1	104 000	10	0,011	300	0,1197	1 370	410
впадина 2	52 330	10	0,011	300	0,1197	690	210
впадина 3	78 170	10	0,011	300	0,1197	1 030	310
впадина 4	37 470	10	0,011	300	0,1197	490	150
впадина 5	22 280	10	0,011	300	0,1197	2 830	850
Артезианский бассейн							
Лепсинский	125 000	10	0,011	400	0,276	4 795	1 440
Балхашский	225 000	10	0,011	400	0,276	6 831	2 050
Алакольский	545 000	10	0,011	430	0,242	123 000	3 690
Алакульский	200 000	10	0,011	500	0,297	6 534	1 960
Таласский южный	45 000	10	0,05	1000	2,12	47 700	14 310
Таласский северный	14 330	10	0,05	1000	2,12	15 190	4 557
Копинская впадина	125 000	10	0,011	300	0,239	3 310	990
Басчи-Кунуруленская впадина	75 000	10	0,011	300	0,239	1 950	585
Зеравшанский артезианский бассейн	417 000	10	0,05	1000	3,18	663 030	198 909
Приташкентский	1 484 000	10	0,05	1000	3,18	2 359 560	707 868
Чаткальский	45 420	10	0,05	1000	2,12	48 124	14 437
Чуйский	175 770	10	0,05	1000	2,12	186 348	55 904
Алма-Атинская впадина	100 000	10	0,011	1000	0,331	3 641	1 092
Чиликская впадина	50 000	10	0,011	300	0,239	2 150	645
Торткентский артезианский бассейн	2 870	10	0,05	1000	2,12	30 422	9 126
Кызыл-Ойский артезианский бассейн	3 000	10	0,05	1000	2,12	3 180	954
Сусамырский	19 000	10	0,05	500	0,23	2 185	656

Продолжение табл. 78

1	2	3	4	5	6	7	8
Сардобский	13 150	10	0,05	500	0,582	3 830	1 150
Нау-Костакозская впадина	67 910	10	0,05	200	0,141	4 790	1 440
Камышкурганская впадина	80 340	10	0,05	200	0,141	5 660	1 700
Артезианский бассейн							
Баш-Кугандинский	3 000	10	0,05	1000	2,12	3 180	954
Токтогульский	21 000	10	0,05	500	0,23	2 415	724
Кочкорский	30 000	10	0,05	1000	2,12	31 800	9 540
Иссык-Кульский	129 000	10	0,05	1000	2,12	136 740	41 022
Джаркентская впадина	100 000	10	0,001	300	0,239	2 600	780
Мирзаравадский	25 070	10	0,05	250	0,100	1 250	380
Джумюльский	18 000	10	0,05	500	0,23	2 070	621
Восточно-Арамсуйский	2 500	10	0,05	1000	2,12	2 650	795
Шахринский	52 760	10	0,05	500	0,582	15 350	4 600
Лякат-Саванская, Исфара-Ляканская впадина	17 480	10	0,05	200	0,141	1 230	370
Пенджикентский артезианский бассейн	123 000	10	0,05	500	0,582	35 790	10 740
Самгарская впадина	34 770	10	0,05	200	0,141	2 450	740
Каракчикум-Канибадамская впадина	37 670	10	0,05	200	0,141	2 660	800
Артезианский бассейн							
Ферганский (западная часть)	1 141 490	10	0,05	1000	2,12	1 209 460	362 838
Тогузтороуский	29 100	10	0,05	500	0,23	3 346	1 004
Кавказский	8 000	10	0,05	1000	2,12	8 480	2 544
Сонкельский	11 000	10	0,05	1000	0,018	99	30
Ферганский (восточная часть)	74 670	10	0,05	1000	2,12	503 182	150 954
Алабуга-Нарынский	209 730	10	0,05	500	0,23	24 150	7 245
Каракурджурский	7 650	10	0,05	1000	2,12	8 109	2 432
Горно-складчатый юго-западных отрогов Гиссара	98 000	10	0,05	1000	2,12	103 880	31 164
Малые бассейны 40-й параллели	54 120	10	0,05	500	0,23	812	243
Баткенский	9 450	10	0,05	500	0,23	1 087	326
Хайдаркан-Карабулакский	22 360	10	0,05	500	0,23	2 572	771
Охинский	3 000	10	0,05	500	0,23	3 450	1 035
Артезианские бассейны							
Шахимардан-Исфайринский	9 230	10	0,05	500	0,23	1 061	3 183
Атбашинский	84 890	10	0,05	500	0,23	9 763	2 929
Сурхандарьинский	231 000	10	0,05	1000	5,28	609 840	182 752
Боусунский	77 000	10	0,05	1000	5,28	203 280	60 984

Продолжение табл. 78

1	2	3	4	5	6	7	8
Саяно-Алтайская область							
Артезианский бассейн							
Назаровский	175 000	10	0,011	300	0,479	9 441	2 832
Северо-Минусинский	300 000	10	0,011	1000	0,331	10 923	3 277
Рыбинский	250 000	10	0,011	800	0,325	8 939	2 681
Сыдо-Ербинский	250 000	10	0,011	50	0,041	1 128	338
Южно-Минусинский	250 000	10	0,011	1000	0,331	9 102	2 731
Саяно-Алтайский район (Бобровская впадиа)	23 661	10	0,011	200	0,173	450	140
Саяно-Алтайский район (Нарымская область)	65 670	10	0,011	200	0,173	1 250	380
Тувинский артезианский бассейн	1 475 000	10	0,011	1000	0,331	537 047	161 114
Саяно-Алтайский район (Зыряновская впадина)	887 040	10	0,011	200	0,173	16 890	5 070
Саяно-Алтайский район (Ленногорская впадина)	18 550	10	0,011	200	0,173	350	100
Северо-Зайсанский артезианский бассейн	165 000	10	0,011	300	0,239	4 340	1 300
Саяно-Алтайский район (Козылсу)	36 660	10	0,011	200	0,173	700	210
Саяно-Алтайский район (впадина 6)	39 300	10	0,011	200	0,173	750	220
Убсанурский	300 000	10	0,011	200	0,331	5 709	1 713
Артезианский бассейн							
Западно-Зайсанский	90 000	10	0,011	150	0,124	1 240	370
Центрально-Зайсанский	105 000	10	0,011	1000	0,331	3 820	1 150
Саур-Тарбагатайский	210 000	10	0,011	750	0,322	7 440	2 230
Восточно-Сибирская область							
Нижне-Муйский	287 000	100	0,011	300	0,120	38 000	11 400
				500	0,149	47 000	14 100
Верхне-Ангарская впадина	680 000	100	0,011	300	0,120	33 000	9 900
				500	0,149	41 000	12 300
Верхне-Муйский	250 000	100	0,011	300	0,120	33 000	9 900
				500	0,149	41 000	12 300
Ципиканский	250 000	100	0,011	300	0,120	33 000	9 900
				500	0,149	41 000	12 300
Цнинский	105 000	100	0,011	300	0,120	14 000	4 200
				500	0,149	17 000	5 100
Баргузинский	500 000	100	0,011	300	0,120	67 000	20 100
				500	0,149	82 000	24 600

Продолжение табл. 78

1	2	3	4	5	6	7	8
Хаимско-Итанцинский	77 000	100	0,011	100	0,035	3 000	900
				500	0,149	12 650	3800
Чикойская впадина	354 000	15	0,005	100	0,035	900	300
				500	0,149	4000	1200
Амуро-Охотская и Сихотэ-Алинская области							
Артезианский бассейн							
Чли-Орельский	37 500	10	0,005	—	—	—	—
				500	0,149	3400	1000
Удыль-Кизинский	150 000	10	0,005	—	—	—	—
				500	0,149	400	—
Торомский	350 000	10	0,005	—	—	—	—
				500	0,149	2600	850
Удский	350 000	10	0,011	—	—	—	—
				500	0,149	2600	850
Тугуро-Нимеленский	362 000	10	0,005	—	—	—	—
				500	0,149	2700	800
Совгаваньский	25 000	10	0,011	—	—	—	—
				500	0,149	400	100
Буреинский	775 000	100	0,005	—	—	—	—
				500	1,149	57 600	17 300
Камчатско-Курильская область							
Озерновский	120 000	10	0,05	500	0,022	14 800	4 440
Тюшевский	160 000	10	0,05	300	0,026	2 300	700
Богачевский	425 000	30	0,05	300	0,129	91 300	27 410
Козыревский	87 000	40	0,05	500	0,22	42 920	12 875
Сахалинская область							
Татарский артезианский бассейн	650 000	20	0,10	1000	0,319	414 700	124 410
Дионовский малый горный артезианский бассейн	90 000	30	0,03	1000	0,319	25 839	7 752

В числителе — данные для четвертичных отложений, в знаменателе — для осадочного чехла.

Тянь-Шаньско-Памирская область распространения углекислых вод подразделяется на два района (Тянь-Шаньский и Памирский), разделенных глубоким Заалайским приразломным прогибом. Тянь-Шань представляет собой горное сооружение, где хребты разделяются межгорными впадинами. Углекислые воды сосредоточены в основном в южных районах центрального Тянь-Шаня и спорадически встречаются в виде проявлений в южном и северном Тянь-Шане. По составу они относятся к нескольким типам, сходным с кавказскими. Большинство проявлений сосредоточено в Киргизии, некоторые — в Таджикистане.

В Памирском районе проявления углекислых вод преимущественно очаговые и имеют максимальные в СССР абсолютные высоты, превышающие 4000 м. Большая часть источников сосредоточена на южном Памире, часть — на Центральном. По типу коллекторов подземные углекислые воды преимущественно трещинные (зоны выветривания) и трещинно-жильные (зоны тектонического дробления пород), редко пластово-трещинные и пластово-карстовые. Суммарная разгрузка углекислых вод Памира — около 5000 м^3/сут. В настоящее время они используются мало.

Саяно-Алтайская область представляет собой сложное тектоническое сооружение, состоящее из системы глыбовых массивов и депрессий, разделяющихся глубинными разломами. Относительно широко распространены углекислые воды в межгорных бассейнах: Кузнецком и Неня-Чумышском. В пределах Восточных, реже Западных Саян выявлены горячие и холодные углекислые воды, приуроченные также к трещинно-жильным системам. Из этих источников используется только Аршанский, где имеется курорт общесоюзного значения.

Восточно-Сибирская область распространения углекислых минеральных вод охватывает в основном Забайкалье, которое относится к каледонской фазе складчатости, Центральное — к герцинской и Восточное — к мезозойской. В Забайкалье сосредоточены значительные запасы холодных углекислых минеральных вод нескольких типов. Некоторые месторождения эксплуатируются курортами и заводами розлива (Дарасунское, Кукинское, Шивандинское и др.).

Амуро-Охотская (Зее-Буреинская) область характеризуется развитием наложенных прогибов, формировавшихся с конца мезозоя. В этой области предположительно углекислые воды развиты в Амуро-Зейском, Уруша-Ольдойском и Верхне-Амурском артезианском бассейнах, приуроченных к наложенным впадинам. В настоящее время эта область предполагаемого распространения углекислых вод слабо изучена, поэтому величины ресурсов их следует рассматривать как сугубо ориентировочные.

Сихотэ-Алинская область характеризуется наличием кайнозойских межгорных впадин, заполненных осадочными и туфогенно-осадочными отложениями, в которых заключены основные ресурсы углекислых минеральных вод. В этой области согласно расчетам сосредоточены значительные ресурсы углекислых минераль-

ных вод трех типов. Для нескольких разведанных месторождений подсчитаны и утверждены эксплуатационные запасы, небольшая часть из них эксплуатируется курортами, водолечебницами и заводами розлива.

В *Камчатско-Курильской* области весьма широко развиты углекислые воды различных типов: сероводородно-углекислых терм действующих вулканов, азотно-углекислых терм районов современной вулканической деятельности, углекислых термальных и холодных вод. Общий дебит источников углекислых вод — около 27 тыс. м³/сут. Характерной чертой Камчатско-Курильской области является близкое соседство различных типов минеральных вод.

В *Сахалинскую* область входят о. Сахалин и часть Тихоокеанского кольца кайнозойской складчатости. Величина ресурсов углекислых вод о. Сахалин подсчитана ориентировочно в связи с их недостаточной изученностью. Тем не менее она свидетельствует о хороших перспективах использования на острове углекислых вод. В настоящее время здесь разведаны Побединское и Синегорское месторождения. На базе Синегорских источников функционирует курорт.

ПРОВИНЦИЯ АЗОТНЫХ ТЕРМ

Азотные термальные воды образуют третью обширную провинцию минеральных вод, прослеживающуюся практически вдоль всех южных и восточных границ СССР, в большинстве случаев непосредственно соседствующих с провинцией углекислых вод. Провинция азотных терм, как и углекислых вод, в основном совпадает с зоной новейшего горообразования, охватывая области как альпийской складчатости, так и палеозойской, омоложенные в кайнозойское время. Формирование азотных терм происходит в молодых зонах тектонических разломов вследствие нагрева проникающих туда инфильтрогенных вод или в глубоких частях артезианских бассейнов вследствие миграции их из фундамента. Поэтому характерной особенностью провинции является наличие молодых глубинных крутопадающих разломов. Выходы гидротерм на поверхность вдоль таких разломов называются термальными линиями, или зонами (например. Кульдурская, Байкальская и др.).

В этой провинции широко развиты трещинные и трещинно-жильные водоносные системы, приуроченные к гидрогеологическим массивам кристаллических и метаморфических пород. Однако достаточно часто термы имеют пластовое залегание в осадочных отложениях артезианских бассейнов межгорных и предгорных прогибов, а также наложенных впадин.

Азотные термы преимущественно натриевые, переменного анионного состава. В мощных осадочных толщах в газовом составе существенную роль играет метан (вплоть до преобладания), в зоне молодых разломов усиливается значение углекислого газа. Иногда для азотных терм характерно повышенное содержание гелия, местами сероводорода, а в гранитах — их радиоактивности.

По минерализации и составу среди азотных терм выделяются две неравноценные группы: 1) слабоминерализованные термы различного ионного состава, занимающие господствующее положение; 2) средне- и высокоминерализованные хлоридные кальциево-натриевые термы, распространенные только на побережьях Берингова, Охотского и Японского морей.

Поскольку обязательным условием формирования азотных терм является также разгрузка их по системам глубинных разрывных дислокаций на поверхность или в верхние горизонты земной коры, оценка ресурсов выполнена по той же методике, что и для углекислых вод: путем выделения региональных дренажных систем, а в их пределах — наложенных впадин.

Платформенная Туранская область распространения азотных слабоминерализованных терм включает два основных бассейна: Сырдарьинский и Бухаро-Каршинский (часть Амударьинского). Исходные данные и результаты расчета ресурсов приведены в табл. 78.

Складчатые области

Кавказская область. Азотные термы в этой области распространены в основном в пределах Большого Кавказа и Закавказья, образуя полосы, частично окаймляющие районы распространения углекислых вод. В пределах Большого Кавказа азотные термы развиты на северном и южном моноклинальном склонах, в его горной части. На моноклинальных склонах они заключены в малых предгорных артезианских бассейнах, приуроченных к синклинальным структурам. Основные водоносные горизонты мезозойского возраста. В предгорьях северного моноклинального склона наиболее широко развит палеогеновый водоносный горизонт. Ресурсы азотных терм этих участков оценивались по той же методике, что и углекислых вод этого района.

Кавказская область обладает большими ресурсами азотных слабоминерализованных терм, широко использующихся здесь курортами и бальнеолечебницами. Известны курорты Цхалтубо, Цаиши, термы Тбилиси. Однако эксплуатационные запасы как утвержденные, так и используемые, составляют незначительную часть от общих ресурсов азотных терм.

Джунгаро-Тянь-Шаньско-Памирская область — область широкого распространения азотных терм, которую можно по структурно-тектоническому признаку разделить на районы: Джунгарский, Восточно-Тянь-Шаньский, Западно-Тянь-Шаньский, Центрально-Памирский. В пределах области развиты два типа водоносных систем: бассейны трещинных вод (гидрогеологические массивы) в горных районах и межгорные артезианские бассейны. Крупные тектонические зоны разграничены глубинными разломами, широко развиты разломы, возрожденные на альпийском этапе. Исходные данные и результаты расчета ресурсов азотных терм Джунгаро-Тянь-Шаньско-Памирской области приведены в табл. 78. Эта

область является одной из наиболее перспективных по обеспеченности ресурсами азотных слабоминерализованных терм. В настоящее время в некоторых районах они уже достаточно широко используются курортами и бальнеолечебницами. Наиболее известны термы Ташкентские, Ходжа-Обигармские, Обигармские, Джалалабадские. Утвержденные эксплуатационные запасы промышленных категорий составляют незначительную часть от общих ресурсов азотных терм этой области.

Саяно-Алтайская область характеризуется также благоприятными условиями для накопления азотных терм, прежде всего в межгорных впадинах, формирующихся вдоль разломов в эпоху альпийской орогении.

Восточно-Сибирская область развития азотных терм включает Прибайкальский и Ингодино-Чикойский районы. Прибайкалье характеризуется резкорасчлененным высокогорным рельефом в пределах Прибайкальского пояса, объединяющего древние архейские глыбы и массивы, цементирующие их докембрийские комплексы, субгеосинклинальные нижнепалеозойские прогибы, каледонские гранитные массивы. С этим поясом пространственно и генетически связаны кайнозойские впадины байкальского типа и крупнейшие межгорные впадины, наложенные на древний субстрат. К этим впадинам приурочены артезианские бассейны с большими запасами подземных вод. В пределах бассейнов Прибайкалья имеются выходы высокотермальных вод, приуроченные к тектоническим разломам в бортах бассейна. Наиболее известные разведанные месторождения — Питателевское и Горячинское.

Амуро-Охотская и Сихотэ-Алинская области распространения азотных терм не разделены. В пределах Амуро-Охотской гидрогеологической складчатой области выделяются Торомский, Буреинский бассейны, а в Сихотэ-Алинской — Тугуро-Нимеленский, Чли-Орельский, Удыль-Кизинский артезианские бассейны и Совгаванский супербассейн. В рассмотренной области имеется ряд источников. Наиболее известны Кульдурские, Анненские, Тырминские. Небольшая часть месторождений разведана.

Верхояно-Чукотская область включает Чукотский и Охотский районы распространения азотных терм. Для нее характерно развитие терм прибрежно-морского типа, особенностями которых являются большая минерализация и преимущественно хлоридный анионный состав. Это обусловлено участием в формировании терм морских вод побережий. Ресурсы области не оценены в связи со слабой изученностью. Практический интерес в настоящее время в первую очередь представляют некоторые источники на Чукотке и на Охотском побережье.

Камчатско-Курильская область относится к зоне активного современного и четвертичного вулканизма. В ней широко развиты термальные источники разнообразного состава.

Многочисленные термальные источники приурочены главным образом к гидрогеологическим массивам. Наиболее широко рас-

пространены азотные кремнистые термы в районах раннечетвертичного вулканизма, особенно в Восточной вулканической зоне. Суммарный дебит источников составляет около 34 тыс. м^3/сут, а общие ресурсы по прогнозной оценке — около 180 тыс. м^3/сут. В этих районах на азотных термах функционируют санатории и водолечебницы. Очаги разгрузки термальных вод по тектоническим разломам имеются также в артезианских бассейнах.

Сахалинская область в отношении развития азотных терм изучена слабо. Проявления азотно-метановых терм имеются в Западно-Сахалинском синклинории. В качестве перспективных на азотные термы рассматриваются Татарский адартезианский бассейн и Дионовский малый межгорный бассейн.

Выполненная региональная оценка показала не только широкое распространение трех основных типов минеральных вод (йодобромных, углекислых и азотных терм), но и их огромные ресурсы, позволила получить количественные характеристики для оценки перспектив различных регионов страны.

Глава 14
РЕСУРСЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОД СССР

Общие закономерности распространения термальных вод на территории СССР и условия их залегания позволяют подойти к выделению перспективных районов, где термальные воды могут рассматриваться как теплоэнергетическое сырье *. При выделении перспективных районов по температурному признаку учитывалось, что нижний предел температуры воды, применяемой для обогрева защищенного грунта и для бальнеопроцедур без дополнительного подогрева, составляет 35 °С, а нижний предел температуры воды, употребляемой для горячего водоснабжения, 40—45 °С. Таким образом, территории, где развиты термальные воды с температурой 35—40 °С и выше, могут рассматриваться как потенциально перспективные. Районы с температурой ниже 35—40 °С относятся к районам с ограниченными перспективами для теплоснабжения. Эффективное использование таких вод связано с применением тепловых насосов.

К перспективным районам по коллекторским свойствам отнесены районы и участки, где водопроводимость водоносных комплексов не менее 10—20 м^2/сут. По минерализации и составу термальная вода желательно должна приближаться к качеству питьевой воды. Тогда ее можно использовать в отопительной системе и для горячего водоснабжения без применения теплообменных

* Данные о ресурсах теплоэнергетических вод приведены из «Объяснительной записки к Атласу карт ресурсов термальных вод СССР», опубликованной в 1983 г.

устройств. Практически большая часть подземных вод имеет повышенную минерализацию — до весьма крепких рассолов. До разработки более надежных, апробированных показателей работы геотермальных систем можно считать, что районы, где развиты термальные воды с минерализацией до 100 г/л, являются перспективными. В подавляющем большинстве случаев воды с такой минерализацией хлоридные натриевые с азотно-метановым и метановым составом газов. Все сказанное относится в основном к термальным водам пластового типа.

К перспективным районам развития термальных вод трещинно-жильного типа можно отнести районы, характеризующиеся многочисленными локальными термопроявлениями, связанными с тектоническими движениями кайнозойского возраста. В пределах этих районов при разведке участков, совпадающих с областью разгрузки термальных вод, вскрываются самоизливающиеся воды с температурой от 35 до 100 °С (в районах современного вулканизма — до 200—250 °С) и минерализацией, редко превышающей 5 г/л. В числе перспективных районов выделяются по условиям залегания и циркуляции термальных вод две группы: 1) районы эпипалеозойских плит, краевых прогибов и межгорных впадин, выполненных мезозойскими и кайнозойскими отложениями с площадным распространением пластово-поровых и пластово-трещинных термальных вод; 2) районы, расположенные в складчатых областях, испытавших интенсивное воздействие новейших тектонических движений и связанных с ними явлений вулканизма, где термальные воды имеют локальное развитие и относятся к трещинно-жильному типу.

К перспективным районам первой группы относятся Западно-Сибирская, Скифская и Туранская платформенные артезианские области, а также межгорные артезианские бассейны: Рионский, отдельные участки Куринского, Ферганского, Таджикского и Джаркентского, Селенгинский, ряд бассейнов о. Сахалина.

К перспективным районам второй группы относятся Камчатская и Курильская гидрогеологические складчатые зоны, гидрогеологические складчатые системы Байкала, Тянь-Шаня, Памира, отдельные части Чукотско-Катазиатского вулканогенного пояса и Кавказа. Прогнозные оценки запасов термальных вод выполнены по перечисленным районам. Районы Восточно-Европейской и Сибирской платформенных артезианских областей, межгорные артезианские бассейны, выполненные отложениями палеозоя, в основном бесперспективны на термальные воды, пригодные для использования, так как в их пределах эти воды относятся к рассолам (до весьма крепких). Термальные воды здесь по количеству и качеству не обеспечивают экономически оправданную их добычу. Гидрогеологические складчатые массивы, которые не испытали интенсивных воздействий неотектонических движений и не имеют поверхностных термопроявлений, также относятся к бесперспективным районам.

Платформенные артезианские области

Западно-Сибирская платформенная артезианская область. В пределах этой области были выделены по гидродинамическим и геотермическим показателям два основных водоносных комплекса — апт-сеноманский (покурский) и неокомский.

Из общих оцененных запасов Западно-Сибирской артезианской области потенциальные запасы при фонтанном способе эксплуатации составляют (табл. 79): по неокомскому комплексу 277 тыс. м³/сут, запасы тепла 19 244,4 тыс. ГДж/год; по альб-сеноманскому комплексу 57 тыс. м³/сут и 1591,8 тыс. ГДж/год. В их составе запасы первоочередного освоения воды с температурой более 50 °С и с минерализацией менее 10 г/л: по неокомскому комплексу 55 тыс. м³/сут, тепла 3229,8 тыс. ГДж/год; по альб-сеноманскому комплексу — соответственно 34 тыс. м³/сут и

Таблица 79

Эксплуатационные запасы термальных вод Западно-Сибирской платформенной артезианской области

Температура, °С	Минерализация, г/л	Способы эксплуатации			
		фонтанный		насосный	
		Q, тыс. м³/сут	*G*, тыс. ГДж/год	*Q*, тыс. м³/сут	*G*, тыс. ГДж/год
Неокомский водоносный комплекс					
40—70	До 3	2	58,8	381	8870,4
	3—10	12	478,8	674	20 890,8
	10—35	8	302,4	669	25 443,6
70—100	До 3	10	550,2	240	14 137,2
	3—10	33	2 137,8	840	55 209
	10—35	212	15 716,4	4 308	294 881,2
Итого		277	19 244,4	7 112	419 962,2
Альб-сеноманский (покурский водоносный комплекс)					
40—70	До 3	16	378	630	15 573,6
	3—10	18	487,2	1 437	49 039,2
	10—35	23	726,6	7 897	318 326,4
Итого		57	1 591,8	9 964	382 939,2
Всего		334	20 836,6	17 076	802 901,4

865,2 тыс. ГДж/год. Использование этих запасов позволит сэкономить до 140 тыс. тут/год.

При насосном способе эксплуатации скважин потенциальные запасы термальных вод и тепловой энергии, в них заключенной, значительно возрастают и составляют по неокомскому водоносному комплексу 7112 тыс. м³/сут и 419 962,2 тыс. ГДж/год: по альб-сеноманскому водоносному комплексу 9964 тыс. м³/сут и 382 939,2 тыс. ГДж/год. Запасы тепла по обоим комплексам при насосном способе эксплуатации скважин эквивалентны 27 млн. тут/год.

Скифская платформенная артезианская область. В артезианской области можно выделить два крупных района: Предкавказский и Равнинного Крыма.

Предкавказский район. В гидрогеологическом отношении территория района представляет собой сложно построенную пластовую водонапорную систему, включающую ряд взаимосвязаиных артезианских бассейнов: Азово-Кубанский, Терско-Кумский (Терско-Каспийский), разделенных Ставропольским сводовым поднятием. Наиболее перспективными по возможностям практического использования термальных вод являются чокрак-караганский и нижнемеловой водоносные комплексы.

Эксплуатационные запасы термальных вод чокрак-караганского водоносного комплекса с минерализаицей до 100 г/л и температурой до 140 °С при фонтанном способе эксплуатации скважин составляют 80 тыс. м³/сут запасы заключенной в них тепловой энергии — 8475,6 тыс. ГДж/год. При насосном способе эксплуатации скважин в случае понижения уровня до 600 м эти показатели соответственно равны 514 тыс. м³/сут, 49 257,6 тыс. ГДж/год. Запасы термальных вод с температурой больше 50 °С и минерализацией до 10 г/л при самоизливе оценены в 65 тыс. м³/сут: их теплоэнергетический потенциал составляет 6581,4 тыс. ГДж/год или 224 тыс. тут/год (табл. 80). Суммарные запасы термальных вод с температурой 55—140 °С и минерализацией до 200 г/л по нижнемеловому водоносному комплексу при фонтанном способе эксплуатации скважин составляют 150 тыс. м³/сут, а запасы заключенной в них тепловой энергии 14376,6 тыс. ГДж/год. При насосном способе эксплуатации скважин и понижении уровней до 600 м эксплуатационные запасы возрастают соответственно до 1093 тыс. м³/сут и 98221,2 тыс. ГДж/год (табл. 80).

Основные запасы термальных вод нижнемелового комплекса связаны с высокоминерализованными водами глубоких частей Скифской артезианской области. Воды с минерализацией до 10 г/л обычно имеют температуру 55—75 °С и развиты в краевых частях бассейна. Показатели запасов этих вод составляют при фонтанном способе эксплуатации скважин 37 тыс. м³/сут и 2373 тыс. ГДж/год: при насосном — 192 тыс. м³/сут и 14015,4 тыс. ГДж/год (см. табл. 80).

Таким образом, запасы термальных вод, которые можно отнести к запасам первоочередного освоения, составляют 1/4 часть всех

Таблица 80

Эксплуатационные запасы термальных вод Скифской платформенной артезианской области (Предкавказье)

Температура, °С	Минерализация, г/л	Способы эксплуатации			
		фонтанный		насосный	
		Q, тыс. м³/сут	G, тыс. ГДж/год	Q, тыс. м³/сут	G, тыс. ГДж/год
Чокрак-карагапский водоносный комплекс					
40—70	До 3	1	16,8	7	243,6
	3—10	14	646,8	66	2 532,6
	10—35	2	105	10	20
70—100	До 3	—	—	1	71,4
	3—10	15	1083,6	132	9 660
	10—35	2	151,2	33	2 583
	35—50	—	50,4	9	802,2
100	До 3	3	361,2	13	1 600,2
	3—10	34	4460,4	170	21 999,6
	10—35	5	651	28	3 553,2
	35—50	3	365,4	16	2 066,4
	50—100	1	583,8	29	3 725,4
Итого		80	8475,6	514	49 257,6
Нижнемеловой водоносный комплекс					
40—70	До 3	7	273	58	2 242,8
	3—10	1	1042	9	365,4
	10—35	4	142,8	30	1 171,8
	35—100	1	37,8	8	327,6
70—100	До 3	14	894,6	33	5 905,2
	3—10	12	785,4	75	3 557,4
	10—35	20	1360,8	120	8 698,2
	35—100	8	621,6	304	19 538,4
100	До 3	2	222,6	9	1 108,8
	3—10	1	155,4	7	840
	10—35	6	382,4	37	3 549
	35—100	47	4964,4	258	28 925,4
	⩾100	27	4494	145	21 991,2
Итого		150	14 376,6	1093	98 221,2

запасов термальных вод нижнемелового водоносного комплекса.

Равнинный Крым. В пределах развития дат-палеоценового водоносного комплекса эксплуатационные запасы термальных вод и геотермальной энергии при фонтанном способе эксплуатации составляют соответственно 23 тыс. м³/сут и 1842 тыс. ГДж/год, что эквивалентно 63 тыс. тут/год; при насосном — 234 тыс. м³/сут и 15 398,5 тыс. ГДж/год, что эквивалентно 577 тыс. тут/год (табл. 81). При фонтанном способе эксплуатации скважин запасы термальных вод нижнемелового водоносного комплекса составляют 40 тыс. м³/сут, геотермальной энергии — 3685 тыс. ГДж/год,

это эквивалентно 125 тыс. тут/год. При насосном способе эксплуатации в случае снижения динамических уровней воды в скважинах в конце расчетного срока до 600 м эксплуатационные запасы и соответственно запасы термальных вод и тепла возрастают до 245 тыс. м³/сут и 19 953 ГДж/год, что эквивалентно сжиганию 700 тыс. тут/год (см. табл. 81).

Запасы термальных вод первоочередного освоения минерализацией до 10 г/л и температурой 50 °С для Равнинного Крыма составляют незначительную часть от общих запасов термальных вод нижнемелового и дат-палеоценового водоносных комплексов. В дат-палеоценовом водоносном комплексе воды минерализацией до 10 г/л приурочены к Керченской гидрогеотермической зоне, запасы по которой равны 1 тыс. м³/сут — при фонтанном способе эксплуатации скважин и 18 тыс. м³/сут — при насосном. В нижнемеловом водоносном комплексе термальные воды минерализацией до 10 г/л связаны с Симферопольской гидрогеотермической зоной и при фонтанной эксплуатации запасы по этой зоне составляют 3 тыс. м³/сут, при насосной — 34 тыс. м³/сут.

Туранская платформенная артезианская область. В пределах области выделено 5 крупных районов: Арало-Каспийский, Бухаро-Каршинский, Сырдарьинский, Центрально-Кызылкумский и Каракумский.

Арало-Каспийский район. В мезо-кайнозойской толще, выполняющей бассейны, выделяются два перспективных водоносных комплекса: неоком-аптский терригенно-карбонатный и альб-сеноман-туронский (в западных районах — альб-сеноманский) — терригенный.

Запасы термальных вод с температурой 45—100 °С из альб-сеноманского комплекса при фонтанной эксплуатации оцениваются в 45 тыс. м³/сут, что в переводе на тепловые ресурсы составляет 1512 тыс. ГДж/год, в том числе запасы первоочередного освоения — с температурой более 50 °С и минерализацией до 10 г/л — 15 тыс. м³/сут или около 420 тыс. ГДж/год. При насосной эксплуатации, учитывая, что оптимальным оказался вариант расчета с понижением динамического уровня до 600 м, запасы оценены в 1425 тыс. м³/сут, что сответствует 57 897 тыс. ГДж/год (табл. 82). Для сравнения отметим, что в 1975 г. Б. Ф. Мавринкий и др. запасы термальных вод с минерализацией до 10 г/л и температурой 40—60 °С в рассматриваемом комплексе оценивали в 310 тыс. м³/сут, или в переводе на тепловые ресурсы в 11 130 тыс. ГДж/год (при расчетах динамический уровень принимался равным 100 м ниже поверхности земли). Суммарные запасы термальных вод с температурой на устье от 55 до 100 °С, которые могут быть получены из неоком-аптского комплекса при насосной эксплуатации (понижение динамического уровня до 600 м) составляют 634 тыс. м³/сут, что соответствует запасам тепла 39 203 тыс. ГДж/год. Использование термальных вод района позволило бы сэкономить до 3,3 млн. тут в год, из которых

Потенциальные эксплуатационные запасы термальных комплексов Скифской платформенной артезианской об

Гидрогеотермические зоны	Средняя глубина залегания комплекса, H, м / Средняя температура, °С	Водопроводимость, km, м²/сут	Статический уровень, $H_{ст}$, м
		Дат-палеоцено	
Тарханкутская	1500 / 65	40	150
Северная	1500 / 65	30	40
Сивашская	1500 / 65	40	50
Белогорская	2500 / 100	50	50

Таблица 81

вод и тепла дат-палеоценового и нижнемелового водоносных бласти (Равнинный Крым) по оптимизированным водозаборам

Способы эксплуатации					
фонтанный			насосный		
Число скважин, n	Динамический уровень, hg, м	Q, тыс. м³/сут / G, тыс. ГДж/год	Число скважин, n	Динамический уровень, hg, м	Q, тыс. м³/сут / G, тыс. ГДж/год
вый водоносный комплекс					
6	—5	6,9 / 308,8	12	600	39,2 / 174,8
3	—5	1,1 / 49,4	12	600	25,4 / 1135,6
3	—5	1,9 / 83,1	12	600	34,1 / 1524,4
6	—5	6,0 / 545,6	24	600	81,2 / 7211,8

Керченская	2000 80	20	50	3	—5	1,2 80,4	12	600	17,7 1 168,1
Мошкаревская	3500 120	40	50	6	—5	6,7 774,5	12	600	36,1 4 183,8
					Итого	22,7 1841,8			233,7 15 398,5
Нижнемеловой водоносный комплекс									
Симферопольская	1000 50	50	80	3	—5	3,2 78,7	12	400	33,9 826,0
Новоселовская	1500 60	50	80	6	—5	5,0 191,8	3	400	6,6 148,7
Альминская	2000 60	50	75	3	—5	3,5 128,2	12	600	45,7 1 684,0
Сивашская	2500 100	100	—25	6	—5	4,1 377,5	12	600	17,8 1 628,1
Белогорская	3000 100	80	40	6	—5	9,2 817,8	24	600	81,2 7 211,8
Мошкаревская	4000 140	50	50	12	—5	14,9 2091,1	24	600	60,2 8 454,0
					Итого	40,0 3684,7			245,2 19 952,6

Таблица 82

Эксплуатационные запасы термальных вод Арало-Каспийского района Туранской платформенной артезианской области

Температура, °С	Минерализация, г/л	Способы эксплуатации			
		фонтанный		насосный	
		Q, тыс. м³/сут	*G*, тыс. ГДж/год	*Q*, тыс. м³/сут	*G*, тыс. ГДж/год
Арало-Каспийский район					
45—70	До 3	5	117,6	43	1 087,8
	3—10	14	369,6	179	5 077,8
	10—35	12	294	157	4 137
	35—100	3	63	289	8 467,2
	100—200	3	63	571	24 263,4
70—100	10—35	1	58,8	15	1 146,6
	35—100	4	298,2	75	6 014,4
	100—200	3	247,8	96	7 702,8
Итого		45	1512	1425	57 897
Неоком-аптский водоносный комплекс					
55—70	3—10	—	—	11	588
	10—35	—	—	151	7 450,8
	35—100	—	—	62	2 566,2
	100—200	—	—	88	3 292,8
70—100	100—200	—	—	322	25 305
Итого				634	39 202,8
Бухаро-Каширский район					
Альб-сеноманский водоносный комплекс					
40—70	До 3	2,1	50,4	41,3	913,5
	3—10	0,5	12,6	184,2	5 847,2
	10—35	0,2	4,2	35,2	1 218,4
	35—100	0,1	2,5	22,4	838,7
Итого		2,9	69,7	283,1	8 817,8
Неоком-аптский водоносный комплекс					
40—70	До 3	0,5	25,2	12,2	604,4
	3—10	1,3	62,6	28,1	1 395,7
	10—35	—	—	9,7	481,3
	35—100	—	—	12,2	603,5
	100—200	—	—	4,2	206,2

Температура, °С	Минерализация, г/л	Способы эксплуатации			
		фонтанный		насосный	
		Q, тыс м³/сут	G, тыс. ГДж/год	Q, тыс. м³/сут	G, тыс. ГДж/год
70—100	До 3	—	—	0,2	13,9
	3—10	—	—	0,6	43,7
	10—35	—	—	0,7	48,3
	35—100	—	—	2,6	185,6
	100—200	—	—	3,1	223,0
Итого		1,8	87,8	73,6	3805,6
Всего по району		4,7	157,5	356,7	12 623,4

Южно-Приаральский район

Неоком-аптский водоносный комплекс

35—70	До 10	2	46,2	29	1 041,6
	10—35	3	75,6	165	7 908,6
	35—100	—	—	71	2 927,4
	100—200	—	—	88	2 562,0
70—100	100—200	—	—	322	25 205,0

Альб-сеноманский водоносный комплекс

До 40	До 10	17	197,4	780	8 677,2
Итого		22	319,2	1455	48 321,8

Каракумский район

Неокомский водоносный комплекс

40—150	10—100	—	—	2,56	105,9

Альб-сеноманский водоносный комплекс

40—150	10—100	—	—	4,92	208,95

50 тыс. тут/год может быть получено за счет фонтанной эксплуатации.

Запасы термальных вод первоочередного освоения сконцентрированы в Южно-Мангышлакском бассейне и оцениваются при самоизливе в 15 тыс. м³/сут, что в пересчете на тепловые ресурсы составляет около 420 тыс. ГДж/год и эквивалентно 14 тыс. тут/год. Учитывая, что Южный Мангышлак относится к числу нефтедобывающих районов, где термальные воды используются для закачки в нефтяные пласты с целью поддержания пластового давления, запасы термальных вод первоочередного освоения могут быть увеличены (за счет включения в число первоочередных участков минерализацией более 10 г/л) до 30 тыс. м³/сут, что в переводе на тепло составит 1218 тыс. ГДж/год это эквивалентно сжиганию 0,4 млн. тут/год.

Бухаро-Каршинский район. Основными водоносными комплексами, перспективными на термальные воды, являются неоком-аптский и альб-сеноманский, разделенные глинами нижнего альба. Запасы термальных вод альб-сеноманского и неоком-аптского водоносных комплексов с температурой от 35 до 100 °С при фонтанном способе эксплуатации скважин составляют до 5 тыс. м³/сут, запасы тепла — до 160 тыс. ГДж/год, что эквивалентно 5,4 тыс. тут/год. При снижении динамических уровней в скважинах в конце расчетного срока до 600 м эксплуатационные запасы термальных вод этих же компонентов возрастают до 356 тыс. м³/сут, запасы тепла до 12 600 тыс. ГДж/год, что эквивалентно сжиганию 470 тыс. тут/год (см. табл. 82). Запасы термальных вод первоочередного освоения минерализацией до 10 г/л и температурой более 50 °С в Бухаро-Каршинском артезианском бассейне составляют незначительную часть от общих запасов рассматриваемых водоносных комплексов (см. табл. 82).

Сырдарьинский район. В разрезе выделяются два основных перспективных водоносных комплекса — турон- и альб-сеноманский. Потенциальные запасы термальных вод и тепла по турон-сенонскому водоносному комплексу при температуре вод 40—70 °С составляют при фонтанном способе эксплуатации 111 тыс. м³/сут и 4830 тыс. ГДж/год при насосном — 2633 тыс. м³/сут и 75 348 тыс. ГДж/год. При фонтанном способе эксплуатации скважин запасы термальных вод альб-сеноманского комплекса с температурой от 40 до 100 °С оцениваются в 59 тыс. м³/сут, запасы тепла 4036 тыс. ГДж/год, что эквивалентно 137 тыс. тут/год. При насосном способе эксплуатации в случае снижения динамического уровня в скважинах в конце расчетного срока до 600 м эти показатели возрастают до 2095 тыс. м³/сут и 99 553 тыс. ГДж/год, что эквивалентно сжиганию 3,4 млн. тут/год. Запасы термальных вод первоочередного освоения минерализацией до 10 г/л и температурой более 50 °С и запасы тепла, в них заключенного, в целом по Сырдарьинскому бассейну составляют при фонтанном способе эксплуатации 142 тыс. м³/сут и 8413 тыс. ГДж/год, при насосном — 2094 тыс. м³/сут и

121 229 тыс. ГДж/год. Запасы тепла эквивалентны при фонтанной эксплуатации 0,2 млн тут/год, при насосной — 4,1 млн. тут/год.

По Южно-Приаральской части Сырдарьинского района суммарные потенциальные эксплуатационные запасы термальных вод и тепла, оцененные по альб-сеноманскому и неоком-аптскому водоносным комплексам, составляют при фонтанной эксплуатации 22 тыс. м³/сут и 319 тыс. ГДж/год: при насосной — 1455 тыс. м³/сут и 48 322 тыс. ГДж/год (см. табл. 82).

Центрально-Кызылкумский район. Термальные воды в исследуемых бассейнах приурочены к отложениям верхнего мела — сенон-турона и сеномана. Запасы термальных вод с температурой 35—50 °С при фонтанном способе эксплуатации для Мынбулакского и Карагатинского бассейнов равны и оцениваются в 5 тыс. м³/сут, при насосном — 285 тыс. м³/сут. Запасы тепла по обоим бассейнам составляют при фонтанной эксплуатации 84 тыс. ГДж/год, при насосной — 5418 тыс. ГДж/год.

Каракумский район. В разрезе осадочного чехла, сложенного породами от нижней юры до четвертичных, выделяются два перспективных водоносных комплекса — неоком-аптский и альб-сеноманский. Потенциальные запасы термальных вод неокомского водоносного комплекса при насосном способе эксплуатации составляют 2560 м³/сут и соответственно по теплу 105 924 ГДж/год. При фонтанном способе разработки эксплуатация термальных вод не эффективна. Потенциальные ресурсы альб-сеноманского комплекса при насосном способе эксплуатации оценены в 4920 тыс. м³/сут и соответственно по теплу — 208 950 тыс. ГДж/год. При фонтанном способе эксплуатация термальных вод экономически не эффективна.

Межгорные артезианские области

В *Рионском артезианском бассейне* наиболее перспективным с точки зрения использования термальных вод является неокомский водоносный комплекс. Оцененные по результатам моделирования на УСМ-I эксплуатационные запасы термальных вод неокомского комплекса утверждены ГКЗ СССР в сумме 158 270 м³/сут по категориям А, В, C_1 и C_2. К категории А (21 520 м³/сут) отнесены запасы по длительно действующим самоизливающимся скважинам с полным режимом наблюдений, к категории В (2378 м³/сут) — запасы по действующим самоизливающимся скважинам, по которым имеются неполные режимные наблюдения (Саберио, Накалакеви). К категории C_1 (74 756 м³/сут) отнесены эксплуатационные запасы по проектным водозаборам, размещенным на участках действующих скважин при условии принудительной эксплуатации с понижениями уровня на 100 м ниже поверхности (за вычетом запасов категории А и В). К категории C_2 (59 616 м³/сут) отнесены запасы по проектным водозаборам (при принудительной эксплуатации с понижениями уровня на 100 м ниже поверхности земли), расположенным на перспективных участках. Если из оцененных за-

пасов исключить запасы по водозаборам Бесленти и Саберио в количестве 11 650 м³/сут, имеющие температуру воды ниже 35 °С, то общие региональные запасы термальных вод неокомского комплекса с температурой 40—105 °С составят 146 620 м³/сут, из них в условиях самоизлива 26 000 м³/сут. При использовании тепла термальных вод неокомского комплекса можно сэкономить 0,4 млн. тут/год.

Куринский и Кусаро-Дивичинский артезианские бассейны. Перспективными в пределах рассматриваемых бассейнов на термальные воды являются водоносные комплексы апшеронских отложений, продуктивной толщи и майкопской свиты (последний комплекс — только в пределах Куринской впадины).

Общие эксплуатационные запасы термальных вод апшеронского комплекса составляют от 10 тыс. м³/сут при фонтанной эксплуатации скважин до 117 тыс. м³/сут при насосной (с понижениями динамических уровней в скважинах до 200—600 м от поверхности земли). Приведенным цифрам отвечают возможные величины экономии топлива — от 7 до 160 тыс. тут/год. Из этих запасов на воды с минерализацией до 10 г/л приходится лишь 7 и 42 тыс. м³/сут, или 6 и 50 тыс. тут/год (соответственно для фонтанной и насосной эксплуатации).

Водоносный комплекс продуктивной толщи неогена имеет общие потенциальные эксплуатационные запасы, рассчитанные на ЭЦВМ, от 13 (при фонтанной эксплуатации скважин) до 77 тыс. м³/сут (при насосной), что по теплу эквивалентно 34—194 тыс. тут/год.

Общие эксплуатационные запасы термальных вод майкопского комплекса изменяются от 30 до 193 тыс. м³/сут (соответственно при фонтанном и насосном способах эксплуатации скважин), что эквивалентно 80—655 тыс. тут/год. Эксплуатационные запасы вод с температурой более 50 °С и минерализацией менее 10 г/л (соответственно указанным способам эксплуатации скважин) составляют 13 и 55 тыс. м³/сут или 30 и 80 тыс. тут/год.

Таким образом, общие эксплуатационные запасы термальных вод по трем рассмотренным комплексам (с температурой на устьях до 110—115 °С и минерализацией до 200 г/л) оценены в 60 (при самоизливе) и 350 тыс. м³/сут (при понижении динамических уровней до 200—600 м ниже поверхности земли), что эквивалентно по теплоэнергетическому потенциалу 140—750 тыс. тут/год. В качестве первоочередных могут рассматриваться лишь запасы в количестве 20 тыс. м³/сут (36 тыс. тут/год), характеризующиеся температурой более 50 °С и минерализацией до 10 г/л, которые могут быть получены при самоизливе.

Кроме охарактеризованных водоносных комплексов в третичных отложениях, в Кировобадской зоне Куринской впадины к категории перспективных может быть отнесен меловой водоносный комплекс. К сожалению, весьма ограниченный объем информации по меловому комплексу не позволил произвести оценку его потенциальных запасов. В связи с изложенными факторами рекомен-

Таблица 83

Эксплуатационные запасы термальных вод Джаркентского артезианского бассейна

Водоносный комплекс	Способы эксплуатации			
	фонтанный		насосный	
	Q, тыс. м³/сут	G, тыс. ГДж/год	Q, тыс. м³/сут	G, тыс. ГДж/год
Меловой	50	3679	204	13 860
Юрский	40	2541	166	10 920
Триасовый	33	2449	93	1 500
Всего	123	8669	463	26 280

дуется провести в районе поисковые работы на термальные воды, приуроченные к меловым отложениям.

Джаркентский артезианский бассейн. В пределах бассейна выделяются три основных водоносных комплекса с термальной водой. Потенциальные запасы термальных вод, рассчитанные на ЭЦВМ, представлены в табл. 83.

Северо-Сахалинский артезианский бассейн. Основные водоносные комплексы с термальной водой приурочены к плиоценовым, верхне-среднемиоценовым и средне-нижнемиоценовым отложениям. Региональные запасы термальных вод о. Сахалин, которые могут быть включены в освоение, составляют 335 тыс. м³/сут, а их тепловой потенциал равен 14,7 млн. ГДж/год или 700 тыс. тут/год (при насосной эксплуатации).

Кроме перечисленных пластовых водонапорных систем с термальными водами, относимых к перспективным, имеется ряд районов, где термальные воды пластового типа могут иметь определенное практическое значение как теплоэнергетическое сырье. К этим районам относятся Ферганский артезианский бассейн, Таджикская водоносная система и бассейны Байкальского рифта — Селенгинский, Тункинский, Баргузинский и, возможно, некоторые другие (например, Чарский). Переоценка запасов термальных вод по этим районам не производилась, краткие данные о запасах были приведены Б. Ф. Маврицким и др. в 1975 г.

В Ферганском бассейне основные запасы сосредоточены в неогеновых отложениях и в условиях насосной эксплуатации (с понижением динамического уровня на 100 м ниже поверхности земли) составляют 130 тыс. м³/сут, а запасы тепла 4,62 млн. ГДж/год. Воды имеют температуру 40—50 °С (реже 70 °С), минерализацию 1—35 г/л.

В Таджикской водонапорной системе основные запасы термальных вод с минерализацией до 35 г/л и температурой до 60 °С сосредоточены в нижнемеловом водоносном комплексе и состав-

ляют в условиях насосной эксплуатации 43 тыс. м^3/сут, запасы тепла в них 1,68 млн. ГДж/год.

В Селенгинском, Тункинском и Баргузинском артезианских бассейнах общие запасы термальных вод в условиях насосной эксплуатации достигают 86 тыс. м^3/сут, а запасы тепла — до 4,2 млн. ГДж/год. Основные запасы сосредоточены в Селенгинском бассейне.

Следует подчеркнуть, что гидрогеотермические условия этих бассейнов недостаточно изучены и при освоении термальных вод оцененные запасы могут быть увеличены.

ТРЕЩИННЫЕ ВОДОНАПОРНЫЕ СИСТЕМЫ

Среди трещинных водонапорных систем к наиболее перспективным для освоения термальных вод и парогидротерм относятся следующие: Камчатская и Курильская системы современного вулканизма, а также система Байкальского рифта. На площади других перспективных районов, таких, как Чукотско-Охотский, Приморский вулканогенный пояс, Саяно-Алтайская, Памиро-Тянь-Шаньская и Кавказская складчатые системы, термальные воды развиты локально и рассредоточены на больших площадях, имеют температуру от 40 до 70 °С (редко до 80—100 °С), минерализацию до 1—3 г/л (редко 20—30 г/л). Большинство термальных вод этих районов используется для лечебных целей, в редких случаях одновременно и для целей теплоснабжения (Кульдур, Талая). Общие потенциальные запасы термальных вод указанных районов составляют в условиях самоизлива 225 тыс. м^3/сут, а запасы тепла для возможного использования 13 230 тыс. ГДж/год.

Основные запасы термальных вод и парогидротерм для использования в целях тепло- и электроснабжения сосредоточены в перспективных районах Курило-Камчатской системы и Байкальского рифта.

На Камчатке все перспективные районы распространения термальных вод связаны либо с горноскладчатыми структурами, либо с вулканическими зонами, в пределах которых выделяются соответственно гидрогеологические массивы или наложенные гидрогеологические структуры — вулканические пояса. Поисково-разведочные работы в пределах термопроявлений проводились и проводятся на 12 месторождениях Камчатки, из них на 4 месторождениях парогидротерм — для оценки возможностей использования их в энергетических целях, на 6 месторождениях термальных вод — для теплоснабжения и на 2 объектах — для бальнеологии и других целей. В результате проведения геологоразведочных работ ГКЗ СССР и ТКЗ приняты запасы по 6 месторождениям: Паужетскому, Больше-Банному месторождениям парогидротерм и Паратунскому, Верхне-Паратунскому, Начикинскому и Эссовскому — термальных вод.

Согласно расчетам, суммарные запасы высокопотенциального теплоносителя с температурой более 100 °С, представленного па-

ром и пароводяной смесью, соответствуют прогнозной электрической мощности геоТЭС около 1000 МВт (табл. 84). Согласно прогнозным оценкам, суммарные запасы термальных вод с температурой до 100 °С по 40 наиболее крупным термопроявлениям составляют 493 600 м^3/сут, а запасы тепла 46,2 млн. ГДж/год. Использование этих запасов могло бы обеспечить ежегодную экономию топлива в количестве 1,6 млн. тут (табл. 85).

В числе первоочередных следует рассматривать 8 объектов с высокопотенциальным теплоносителем для обеспечения геоТЭС прогнозной мощностью 650 МВт и 10 объектов с термальными водами, прогнозные запасы которых составляют около 105 тыс. м^3/сут, или в пересчете на тепло 10,92 млн. ГДж/год, что эквивалентно сжиганию 0,4 млн. тут в год (объекты первоочередного освоения в табл. 84 и 85 подчеркнуты).

Район Курильских островов — это второй район современного вулканизма на территории Советского Союза. Наибольший практический интерес на этих островах представляют термопроявления с температурой выше 100 °С. Их общая тепловая разгрузка, по данным Л. Н. Барабанова, близка к 323 тыс. КДж/с. Эта цифра соответствует кислым, нейтральным и слабощелочным гидротермам, причем кислые составляют примерно 2/3 от общей тепловой разгрузки. Для освоения наиболее доступны системы вулканов Эбеко на о. Парамушире, Баранского и Тебенькова — на о. Итурупе, вулканов Менделеева и Головнина — на о. Кунашире.

К настоящему времени разведан только один участок в гидротермальной системе вулкана Менделеева на о-в Кунашир (Горячий Пляж), где запасы парогидротерм оценены в количестве 4300 т/сут. Разведочные работы показали, что при увеличении глубины скважин быстро нарастает минерализация выводимых на поверхность пароводяных смесей.

Увеличение минерализации приводит к интенсивному солеотложению в стволах скважин в зоне вскипания перегретых вод, что осложняет разведку и последующую эксплуатацию. Эти обстоятельства заставляют ограничивать глубины скважин при разведке парогидротерм на Курильских островах, тем самым несколько ограничивается и возможная теплоэнергетическая мощность разведуемых термоаномалий. В условиях Курильских островов коэффициент увеличения мощности естественной разгрузки при разведке, по-видимому, не превысит 2—3. Исключив из подсчета кислые флюиды и введя коэффициент увеличения при разбуривании, равный 3, получим, что суммарные запасы высокопотенциального теплоносителя по четырем указанным выше гидротермальным системам могут обеспечить в совокупности работу геоТЭС мощностью от 30 (если теплоноситель будет представлен пароводяной смесью) до 80 МВт (теплоноситель представлен преимущественно паром). Прогнозная мощность геоТЭС для каждой системы в отдельности составляет (в МВт): влк. Эбеко — 5—10, влк. Баран-

Месторождения и термопроявления	Максимальная температура в источниках, °С	Суммарный дебит, л/с	
		видимой разгрузки	общей разгрузки с учетом скрытой разгрузки
			Камчатские
Верхне- и Средне-Киреунские	99,5	20—40	—
Апапельские	97—100	4	≫10
Верхне-Семячикские	137	70 *	510 *
Нижне-Семячикские	50	340 *	500 *
Карымчинские	95	Незначительный	117
Больше-Банное ** месторождение	103	38	110
Мутновско-Жировское месторождение, в том числе	—	—	—
Нижне-Жировские (Право- и Левобережные)	99,5	18	Правобережные
Дачные	98	175 *	21
Северо-Мутновские (западные)	110	59 *	32 800
Северо-Мутновские (восточные)	98		
Войновские и др. (Перевальные, Верхне-Жировские)	93	12	—
Паужетское месторождение **	100	31	100
Кошелевские			
Нижне-Кошелевское месторождение	101,5	237 *	250 *
Верхне-Кошелевское	96	480 *	530 *
Камбальные	98	35 *	100 *
Ходуткинские	88 (на глубине 1 м 100 °С)	16,0	115
			Курильские
Вулкана Эбеко	97—100	20	—
Вулканов Баранского и Тебенькова	95—100	72	—
Вулкана Менделеева	95—100	15—20	—
Вулкана Головнина	97—100	—	—

* Расход теплоносителя дан условно, приведен к расходу воды с температурой
** Месторождения, разведанные с утвержденными запасами: Больше-Банное 156 кг/с

Примечание. В табл. 84 и 85 подчеркнуты объекты первоочередного освоения

Таблица 84

районов современного вулканизма

Вынос тепла в естественных условиях, тыс. кДж/с	Прогнозная температура на глубине (до 1500), °С	Прогнозные ресурсы, рассчитанные методом эмпирических коэффициентов, кг/с	Прогнозная тепловая мощность, тыс. кДж/с		Прогнозная мощность ГеоТЭС, МВт
			для систем с ПВС	для систем с преобладанием пара	
чатка					
—	170	210	97,0		9
—	170	40	18,5		2
294—315	—	—	Суммарно по Верхне- и Нижне-Семячикским	882,0	264
—	—	—			
76,2	165	468	207,3		18
—	165 (фактическая)	157	69,2		6
153,7	170—250	—	—		295
16,0	170	126	58,2		5
73,5	200—250	—			
8,8	200—250	—	—	966,0	290
19,3	200—250	—	—		
36,1	—	—	—		
63,0	200 (фактическая)	460	270,5		35
105	253			315	95
222,6	1200			667,8	200
42				126	38
<0,01	170	460		212,5	19
		Итого		—	962
острова					
43,7	—	—	32,1	43,7	5—13
47,0	—	—	34,6	47,0	5—14
90,7	—	—	67,0	90,7	9—27
96,6	—	—	71,4	96,6	9—29
			Итого		28—83

Всего по районам современного вулканизма 1010—1065 МВт

100 °С, необходимому, чтобы обеспечить замеренный и рассчитанный вынос тепла. с теплосодержанием 663,6 кДж/кг, Паужетское — соответственно 176 кг/с и 735 кДж/кг.

на Камчатке.

Прогнозные ресурсы термальных

Месторождения и термопроявления (источники)	Максимальная температура в источниках, °С
	Камч
Тымлатские	47,5
Паланские	95
Дранкинские	62,5
Ивашкинские	41,5
Русаковские, в т. ч.	
Горячего лога	54
Хухлотваямские средние	76
Хухлотваямские нижние	76
Русаковские	75
Двухюрточные	
центральные	73,7
южные	73
Нижне-Киреунские	67
Нижне-Апапельские	78
Оксинские	58,5
Анавгайское месторождение	52
Эссовское месторождение *	65

Таблица 85

вод районов современного вулканизма

Суммарный дебит, л/с		Прогнозная температура на глубине (до 1500 м), рассчитанная по силикатному геотермометру, °С	Прогнозные ресурсы, рассчитанные методом эмпирического коэффициента, м³/сут	Прогнозные эксплуатационные ресурсы тепла, тыс. ГДж/сут
видимой разгрузки	общей разгрузки с учетом скрытой			
атка				
25	—	90	15 120	3,8
21	—	110	12 700	4,3
10	—	75	6 048	1,1
25	—	60	15 120	1,9
		90	49 420	12,5
8				
40	143			
60				
35				
7,7	25	105	4 666	1,5
3,8	—	100	2 298	0,7
4,5	—	85	2 765	0,6
1,0	—	120	605	0,2
8,8	10	115	5 357	1,9
7,0	35	95	12 096	3,3
7,7	16	85	5 616	1,3

Козыревские	54,5	2,5	11,5	70	3 974	0,7
Нижие-Щапинские	40	28,5	—	95	17 280	4,7
Верхне-Щапинские	56	35	—	115	21 168	7,6
Тумрокские	70	6	—	115	3 629	1,3
Мало-Чажминские	67	5,0	—	75	3 024	0,6
Верхне-Чажминские	72	19,3	—	85	11 664	2,7
Нижне-Чажминские	56	30	120	85	41 472	9,6
Тюшевские	64	70	—	90	42 336	10,7
Карымские	45	10	—	110	6 048	2,0
Краеведческие	58	7,0	23	110	7 776	2,6
Налычевские	75	8	30	105	10 368	2,0
Горячереченские	55	10	53	120	17 280	6,5
Пиначевские	12,5	2	15	70	5 184	0,9
Малкинские	83	12	28	95	9 677	2,6
Начикинские	81	12,5	40	95	13 824	3,8
Южно-Бережная группа						
Турпанские	20	1,5	—	60	863	0,1
Ягодные	28	0,5	—	75	346	0,07
Паратунское *, в том числе:						
Северный участок	48	1				
Нижний участок	61,6	26,3				
Средний участок	81,5	2,8				
Верхне-Паратунское *	70,5	15	70			
Карымшинское	76,5	2,0	80	80	1 210	0,3

Продолжение табл. 85

Месторождения и термопроявления (источники)	Максимальная температура в источниках, °С	Суммарный дебит, л/с		Прогнозная температура на глубине (до 1500 м), рассчитанная по силикатному геотермометру, °С	Прогнозные ресурсы, рассчитанные методом эмпирического коэффициента, м³/сут	Прогнозные эксплуатационные ресурсы тепла, тыс. ГДж/сут
		видимой разгрузки	общей разгрузки с учетом скрытой			
Мало-Банные	78	1,5	25	100	8 640	2,5
Апачинское	72	10	30	100	10 368	3,0
Вилючинские, в том числе					19 008	6,0
Нижне-Вилючинские,	90	14,0	55	110		
Верхне-Вилючинские	60	6,0		105		
Войновские	93	12,0	20	115	7 258	2,6
Опальские	74	25,0	—	90	15 120	3,8
Саванские	75	>12	—	90	7 258	1,8
Голыгинские	74	10,0	—	95	6 048	1,7
Кужетенские	65	23,0	—	75	13 910	2,6
Ксудачинские	80	4,0	—	110	2 419	0,8
Озерновские	85,5	8,8	—	95	5 357	1,5
Итого 493 600 м³/сут с запасами 46,2 млн. ГДж/год или 1,6 млн. тут./год						
Курильские острова						
О-в Итуруп						
Рейдовские	72	>0,5	Нет сведений	95	>43	0,01
Горячие Ключи	55	2		105	518	0,16
О-в Кунашир						
Добрый Ключ	69	>0,5	—	80	43	0,01
Столбовские	80	2	—	105	518	0,16
Третьяковские	87,5	2	—	130	518	0,2
Алехинские	56	14	—	70	3 629	0,6
Итого >5270 м³/с 429,2 тыс. ГДж/год = 146 000 тут./год						
Всего по районам современного вулканизма 498 900 м³/сут ~46,6 млн. ГДж/год или ~1,6 млн. тут/год						

• Месторождения разведанные с утвержденными запасами: Эссовское 12,9 тыс. м³/сут с температурой 75 °С; Начикинское 1037 м³/сут с температурой 75—80 °С; Паратунское 23,3 тыс. м³/сут с температурой 77 °С; Верхне-Паратунское 23,3 тыс. м³/сут с температурой 76,5 °С.

Таблица 86

Характеристика термальных источников и прогнозные запасы термальных вод трещинно-жильного типа Байкальской складчатой системы

Источник	Расход в естественном выходе, м³/сут	Температура на выходе, °С	Прогнозные		
			запасы воды, м³/сут	температура °С	запасы тепла, ГДж/год
Чарский	6060	50	8 640	65	1 268,4
Котельников-	865—1730	45—60	3 460	85	798
Коркейский	865	42	2 590	60	327,6
ский (Ангаро-канский)					
Шуринда	1730	67	3 460	75	655,2
Кучехирский	865	49	2 590	65	382,2
Умхейский	605	48—50	1 730	65	252,0
Сейюйский	1380	55	3 460	70	579,6
Могойский	6910	81	8 640	85	1 596
(Ципинский)		41	865	60	109,2
Давшинский	100	50—75	3 460	80	726,6
Аллинский	865	45	7 350	65	1 079,4
Хакусский	7340	55	2 590	70	436,8
Баунтовский	865	76	865	80	180,6
Гаргинский	260	44	1 300	65	189
Быстринский	430	55	2 160	75	407,4
Горяченский	1990	68	2 590	75	491,4
Питателевский	1990				
Гусихинский	350	55—70	1 300	75	243,6
Нилова	1730	42	2 160	65	319,2
Пустынь					
Олекминский	8640	48	17 280	65	254,1
Дзелиндийский	605	43	865	60	109,2
Большеречен-ский	90	74	865	80	180,6
Муяканский	3445	57	4 320	65	638,4
Всего			72 145		11224,5 (170 тыс. тут/год)

Примечания. 1. Прогнозная температура определена с применением кремний-геотермометра T_{Si}. 2. Для источников Горяченского, Питателевского, Ниловой Пустыни проведены разведочные работы с бурением скважин глубиной 100—375 м.

ского и Тебенькова 5—15, влк. Менделеева — 10—25, влк. Головнина — 10—30 МВт.

Прогнозные запасы термальных вод с температурой в естественных выходах до 100 °С по 6 наиболее крупным и перспективным для освоения объектам на о-вах Кунашире и Итурупе составляют более 5000 м³/сут, а запасы тепла, в них заключенного, оцениваются в 429,2 тыс. ГДж/год или 146 тыс. тут/год (см. табл. 85).

Складчатая система Байкальского рифта. Все многочисленные современные гидротермы Байкальской складчатой системы приурочены к разрывным нарушениям и выходят в бортовых частях впадин-грабенов, образовавшихся в неоген-четвертичное время.

С системой крупных разломов был связан также неоген-четвертичный вулканизм.

Суммарный дебит всех известных термальных источников Байкальского рифта может составить около 72 тыс. $м^3$/сут. Все термальные источники расположены в зоне Байкало-Амурской железнодорожной магистрали и их разведка и освоение позволят использовать тепловой потенциал этих термопроявлений, достигающий 170 тыс. тут/год для организации местного теплоснабжения и развития местного бальнеолечения (табл. 86).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Советский Союз обладает весьма значительными ресурсами минеральных, теплоэнергетических и промышленных подземных вод, что определяет широкое их использование в различных отраслях народного хозяйства. Дальнейшее расширение использования глубоких подземных вод в бальнеологии и пищевой промышленности, в качестве минерального и теплоэнергетического сырья требует изучения и оценки их ресурсов в пределах отдельных гидрогеологических регионов и подсчета эксплуатационных запасов для конкретных месторождений. Такая оценка потребует проведения специальных геологоразведочных работ, включающих капиталоемкое бурение глубоких скважин и сложное и длительное их гидрогеологическое опробование. В связи с этим при геологоразведочных работах должны строго соблюдаться стадийность и последовательность, предусматривающие переход к детальным исследованиям после оценки результатов предшествующих.

Первая стадия изучения подземных минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод включает региональные исследования и прогноз ресурсов и эксплуатационных запасов различных типов подземных вод. Региональные гидрогеологические исследования имеют принципиальное значение, так как использование методики, изложенной в данной работе и апробированной практикой, позволяют выявить размеры месторождений глубоких подземных вод, оценить потенциальные ресурсы этих месторождений, установить наличие и местоположение перспективных и эксплуатационных участков и обосновать возможность и целесообразность их разведки и практического освоения.

Современное состояние региональной изученности подземных минеральных, теплоэнергетических и промышленных вод неодинаково. Гидрогеологи располагают картой распространения подземных минеральных вод на территории СССР масштаба 1 : 2 500 000 (для гидрогеологических регионов и союзных республик масштаба 1 : 1 000 000) и картой прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов основных типов минеральных вод на территории СССР масштаба 1 : 5 000 000 Атласом карт термальных подземных вод, включающим результаты региональной оценки их потенциальных запасов для территории СССР в масштабе 1 : 5 000 000 и крупных эпипалеозойских платформенных областей в масштабе 1 : 2 500 000; картой прогнозных эксплуатационных запасов промышленных йодо-бромных вод СССР масштаба 1 : 4 000 000 и картой эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов гидроминерального сырья масштаба 1 : 2 500 000 (с врезками по перспективным районам масштабов 1 : 500 000—1 : 1 000 000).

Исследования региональных закономерностей распространения, геохимии и условий формирования подземных минеральных, термальных и промышленных вод позволили выделить на территории СССР их провинции и области распространения и произвести в пределах этих провинций и областей оценку эксплуатационных ресурсов и прогнозных запасов глубоких подземных вод. Установлено, что провинции углекислых минеральных вод и азотных терм связаны с горноскладчатыми регионами юга СССР, а метановые и азотно-метановые йодо-бромные (и сероводородные) воды — с осадочным чехлом древних и эпигерцинских платформ. Основные ресурсы термальных подземных вод сосредоточены в пределах Скифской, Туранской и Западно-Сибирской плит, а высокотермальные воды и парогидротермы — главным образом в Курило-Камчатской области современного вулканизма. Установлено также, что основные ресурсы гидроминерального сырья (промышленных подземных вод) сосредоточены в пределах крупных платформенных артезианских бассейнов, предгорных и межгорных впадин. При этом основными аккумуляторами йода, брома, лития, рубидия, цезия, стронция, бора и других редких и рассеянных элементов являются хлоридные минерализованные воды и рассолы. Исследованию закономерностей распространения минеральных, термальных и промышленных подземных вод во многом способствовали разработка и практическое применение принципов и методов их картирования. Результаты региональных исследований и картографирования глубоких подземных вод являются надежной научной основой их поисков и разведки. Практика показала, что прогнозы месторождений и ресурсов глубоких подземных вод весьма достоверны и в подавляющем большинстве случаев подтверждаются последующими геологоразведочными работами. Это в полной мере относится к методам разведки, подсчета запасов и геолого-экономической оценки месторождений глубоких подземных вод, прошедших широкую апробацию в ГКЗ СССР.

Глубокие подземные воды — комплексные полезные ископаемые. Промышленные воды часто характеризуются высокими температурами и содержанием специфических бальнеоактивных компонентов, превышающих нормативы для минеральных лечебных вод. Аналогично этому в большинстве случаев теплоэнергетические воды являются одновременно минеральными, что позволяет совместно рассмотреть в работе методы изучения и оценки ресурсов минеральных, термальных и промышленных вод.

В последние годы при изучении глубоких подземных вод как минерального сырья существенно увеличилось число исследуемых элементов. Региональные оценочные работы, результаты технологических и геолого-экономические исследования свидетельствуют о высокой экономической эффективности освоения этого вида полезного ископаемого. Расширение использования глубоких подземных вод в народном хозяйстве будет способствовать увеличению минерально-сырьевого и теплоэнергетического потенциала страны и ускорению научно-технического прогресса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барс Е. А.* Органическая гидрогеохимия нефтегазоносных бассейнов. М., Недра, 1981.
2. *Бондаренко С. С., Куликов Г. В.* Подземные промышленные воды. М., Недра, 1984.
3. *Бондаренко С. С., Куликов Г. В., Стрепетов В. П.* Научные и методические основы изучения, оценки и разработки месторождений промышленных вод.— Водные ресурсы, 1985, № 2, с. 175—177.
4. *Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М., Недра, 1973.
5. *Валяшко М. Г.* Закономерности формирования месторождений калийных солей. М., Изд-во МГУ, 1962.
6. *Вартанян Г. С.* Поиск и разведка месторождений минеральных вод в трещинных массивах. М., Недра, 1973.
7. *Вартанян Г. С.* Месторождения углекислых вод горноскладчатых регионов. М., Недра, 1977.
8. *Гаттенбергер Ю. П.* Гидрогеология и гидродинамика подземных вод. М., Недра, 1971.
9. *Гидрогеология* СССР. Сводный том, вып. 1. М., Недра, 1976.
10. *Гидрогеологические* условия Нечерноземной зоны РСФСР/Под ред. Г. В. Куликова. М., Недра, 1983.
11. *Гуревич А. В., Капченко Л. Н., Кругликов Н. М.* Теоретические основы нефтяной гидрогеологии. Л., Недра, 1972.
12. *Зайцев И. К., Толстихин Н. И.* Закономерности распространения и формирования подземных минеральных вод. М., Недра, 1972.
13. *Закономерности* распространения и формирования металлоносных рассолов/Г. А. Голева, М. В. Торикова, Л. Н. Алексинская, Н. А. Солодов. М., Недра, 1981.
14. *Зорькин Л. М., Старобинец И. С., Стадник Е. В.* Геохимия природных газов нефтегазоносных басейнов. М., Недра, 1984.
15. *Иванов В. В., Невраев Г. А.* Классификация подземных минеральных вод. М., Недра, 1964.
16. *Изыскания* и оценка запасов подземных промышленных вод/Под ред. С. С. Бондаренко, Н. В. Ефремочкина. М., Недра, 1976.
17. *Инструкция* о содержании, оформлении и порядке представления в ГКЗ СССР технико-экономических обоснований кондиций на минеральное сырье. М., ГКЗ СССР, 1984.
18. *Инструкция* по применению классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод к месторождениям промышленных вод. М., ГКЗ СССР, 1985.
19. *Инструкция* по применению классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод к месторождениям минеральных вод. М., ГКЗ СССР, 1985.
20. *Инструкция* по применению классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод к месторождениям теплоэнергетических вод. М., ГКЗ СССР, 1985.
21. *Капченко Л. Н.* Гидрогеологические основы теории нефтегазонакопления Л., Недра, 1983.
22. *Карцев А. А., Никаноров А. М.* Нефтегазопромысловая гидрогеология. М., Недра, 1983.
23. *Кашкаров О. Д.* Графические расчеты солевых систем. Л., Госхимиздат, 1960.

24. *Классификация* эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод. М., ГКЗ СССР, 1983.
25. *Клименко И. М., Медведев С. А., Попов В. М.* Состояние и перспективы комплексной утилизации ценных компонентов природных и техногенных минерализованных вод. М., ВИЭМС, 1981.
26. *Кононов В. И.* Геохимия термальных вод областей современного вулканизма. М., Наука, 1983.
27. *Крайнов С. Р., Швец В. М.* Основы геохимии подземных вод. М., Недра, 1980.
28. *Крамаренко Л. Е.* Геохимическое и поисковое значение микроорганизмов подземных вод. Л., Недра, 1983.
29. *Крашин И. И.* Моделирования фильтрации и теплообмена в водонапорных системах. М., Недра, 1976.
30. *Куликов Г. В., Вартанян Г. С.* О механизмах движения подземных вод в глубоких зонах. В кн.: М-лы 27 Междунар. геол. конгресса, том. 16. М., 1984, с. 10—15.
31. *Назаркин Л. А.* Влияние темпа седиментации и эрозионных срезов на нефтегазоносность осадочных бассейнов. Саратов, Изд-во Сарат. ун-та, 1979.
32. *Маврицкий Б. Ф.* Термальные воды складчатых и платформенных областей СССР. М., Наука, 1971.
33. *Методические* рекомендации по геохимической оценке и картированию подземных редкометальных вод. М., ВСЕГИНГЕО, 1977.
34. *Методические* рекомендации по поискам, разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных термальных вод. М., ВСЕГИНГЕО, 1983.
35. *Овчинников А. М.* Минеральные воды. М., Госгеолтехиздат, 1963.
36. Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология/Под ред. Е. В. Пиинекера. Новосибирск, Наука, 1980.
37. *Основы* гидрогеологии. Гидрогеохимня/Под ред. С. Л. Шварцева. Новосибирск, Наука, 1982.
38. *Пиннекер Е. В.* Проблемы региональной гидрогеологии. М., Наука, 1977.
39. *Пиннекер Е. В.* Генезис подземных вод. В кн.: Основы гидрогеологии. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах. Новосибирск, Наука, 1982, с. 189—235.
40. *Посохов Е. В.* Химическая эволюция гидросферы. Л., Гидрометеоиздат, 1981.
41. *Правила* измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. М., Госстандарт, 1980.
42. *Природные* изотопы гидросферы/Под ред. В. И. Ферроиского. М., Недра, 1975.
43. *Роговская Н. В.* Гидрогеологическое картирование. Обзор отечественного и зарубежного опыта составления гидрогеологических карт. М., Наука, 1981.
44. *Ронов А. Б.* Осадочная оболочка Земли (количественные закономерности строения, состава и эволюции). М., Наука, 1980.
45. *Смирнов С. И.* Происхождение солености подземных вод седиментационных бассейнов. М., Недра, 1970.
46. *Ходжакулиев Я. А., Абукова Л. А.* Палеогидрогеологические исследования при поисках нефти и газа. М., Недра, 1985.
47. *Филатов К. В.* Основные закономерности формирования химического состава подземных вод и поисковые признаки нефтегазоносности. М., Недра, 1976.
48. *Шварцев С. Л.* Гидрогеохимия зоны гитергенеза. М., Недра, 1978.
49. *Щербаков А. В., Козлова Н. Д., Смирнова Г. Н.* Газы термальных вод. М., Наука, 1974.
50. *Шпак А. А.* Методические рекомендации по региональной оценке эксплуатационных запасов термальных вод. М., ВСЕГИНГЕО, 1980.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение. *С. С. Бондаренко, Г. С. Вартанян* 3

Часть I

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Глава 1. **Состояние и перспективы народнохозяйственного использования глубоких подземных вод** 9

Народнохозяйственные проблемы гидрогеологии. *С. С. Бондаренко, Г. С. Вартанян, Г. В. Куликов, А. А. Шпак* 9
Использование глубоких подземных вод в СССР и за рубежом. *С. С. Бондаренко, В. М. Попов, Г. К. Антоненко, А. А. Шпак, Г. С. Вартанян, Р. И. Плотникова, Р. И. Иовчев, Л. И. Рохлин, В. З. Рубейкин* . . . 23

Глава 2. **Понятие о глубоких подземных водах** 63

Промышленные воды. *С. С. Бондаренко, В. П. Стрепетов* 63
Минеральные воды. *Г. С. Вартанян, Р. И. Плотникова* 68
Теплоэнергетические воды. *Г. К. Антоненко, Б. Ф. Маврицкий, Н. С. Отман, А. А. Шпак* 70
Попутные воды месторождений полезных ископаемых. *Р. И. Иовчев, Г. К. Павленко, Л. И. Рохлин, В. З. Рубейкин* 75

Глава 3. **Районирование и общие закономерности распространения глубоких подземных вод** 80

Принципы и схема гидрогеологического районирования территории СССР. *С. С. Бондаренко, Г. С. Вартанян, Н. М. Ельманова, В. П. Стрепетов* . . 80
Общие закономерности распространения различных типов глубоких подземных вод. *С. С. Бондаренко, Г. С. Вартанян, Г. В. Куликов, В. М. Попов* 94
Зональность подземных вод. *Е. И. Линькова, В. М. Попов* 99

Глава 4. **Особенности динамики глубоких подземных вод** 113

О механизмах движения подземных вод глубоких зон. *Г. С. Вартанян, Г. В. Куликов* 113
Процессы движения подземных вод пластовых водонапорных систем в породах-коллекторах. *Л. В. Боревский* 119
Методы анализа региональной динамики подземных вод. *С. С. Бондаренко, Л. В. Боревский, А. Т. Печерин* 128

Глава 5. **Генетические особенности и условия формирования глубоких подземных вод** 139

Генетические типы и изотопный состав подземных вод глубоких горизонтов. *Г. С. Вартанян, В. М. Попов* 139
Геохимическая систематика и классификация природных вод. *С. С. Бондаренко, Г. С. Вартанян, В. М. Попов* 142
Происхождение и формирование глубоких подземных вод. *С. С. Бондаренко, В. М. Попов* 150
Подземные седиментационные рассолы как хлоридные системы и их стратиграфическая приуроченность. *В. М. Попов* 167
Палеогидрогеохимический анализ формирования состава седиментационных рассолов. *В. М. Попов* 185

Часть II

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Глава 6. **Месторождения глубоких подземных вод, их классификация и типизация** 212

Понятие о месторождениях подземных вод и общие принципы их выделения. *В. П. Стрепетов* 212
Месторождения промышленных вод. *С. С. Бондаренко, В. П. Стрепетов* 220
Месторождения минеральных вод. *Г. С. Вартанян, Г. В. Куликов, Р. И. Плотникова* 222
Месторождения теплоэнергетических вод. *Г. К. Антоненко, Н. С. Отман, А. А. Шпак* 228

Глава 7. **Методы изучения месторождений глубоких подземных вод** 233

Стадийность и содержание гидрогеологических исследований. *В. П. Стрепетов* 233
Изучение гидрогеологических параметров глубоких водоносных горизонтов. *С. С. Бондаренко, Л. В. Боревский, Г. С. Вартанян* 237
Специфические факторы, влияющие на точность оценки параметров глубоких водоносных горизонтов. *С. С. Бондаренко, Л. В. Боревский, Н. В. Ефремочкин, Е. И. Линькова, А. А. Шпак* 257

Глава 8. **Картографирование глубоких подземных вод и их месторождений** 269

Современное состояние гидрогеологического картографирования глубоких подземных вод. *С. С. Бондаренко, Г. С. Вартанян, А. А. Шпак* . . . 269
Принципы и методы картографирования месторождений подземных промышленных вод. *С. С. Бондаренко, В. А. Комягина, А. Т. Печерин, В. В. Стрепетов* 273
Картографирование месторождений подземных минеральных вод. *Г. С. Вартанян, В. П. Кривошеев, Р. И. Плотникова* 279
Картографирование подземных термальных вод и их месторождений *Г. К. Антоненко, Б. Ф. Маврицкий, А. А. Шпак* 285

Глава 9. **Методика гидрогеологических исследований на месторождениях глубоких подземных вод** 289

Основные виды гидрогеологических исследований и их назначение. *Г. С. Вартанян, В. П. Стрепетов* 290
Гидрогеологические исследования при поисках и разведке месторождений. *С. С. Бондаренко, Г. С. Вартанян, Р. И. Плотникова, В. П. Стрепетов, А. А. Шпак* 292
Гидрогеологические исследования на эксплуатируемых месторождениях. *Н. В. Ефремочкин, Р. И. Плотникова* 305
Использование специальных методов при поисках и разведке глубоких подземных вод. *Р. И. Плотникова* 317
Особенности гидрогеологических исследований на месторождениях парогидротерм. *Н. С. Отман* 326
Лабораторные экспериментальные гидрогеологические исследования. *И. Н. Курбанов, В. В. Мазин, В. П. Стрепетов* . . . . . .

Часть III

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Глава 10. **Принципы и методы оценки ресурсов и эксплуатационных запасов месторождений глубоких подземных вод** 335

Понятие об основных видах ресурсов и запасов глубоких подземных вод. *Р. И. Плотникова, В. П. Стрепетов* 335

Эксплуатационные запасы подземных вод, их классификация и категоризация. *В. П. Стрепетов* 338
Методы оценки эксплуатационных запасов глубоких подземных вод. *Л. В. Боревский, Р. И. Плотникова, В. П. Стрепетов* 339
Региональная оценка эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов глубоких подземных вод. *С. С. Бондаренко, Г. С. Вартанян, А. Т. Печерин, Р. И. Плотникова, А. А. Шпак* 354
Анализ влияния физических деформаций коллекторов на оценку эксплуатационных запасов подземных вод в глубоких водоносных горизонтах. *Л. В. Боревский* 374

Глава 11. **Геолого-экономическая оценка месторождений глубоких подземных вод** 395

Задачи и особенности геолого-экономической оценки месторождений глубоких подземных вод. *С. С. Бондаренко, Л. А. Лубенский, В. П. Стрепетов* 396
Технико-экономические показатели освоения месторождений глубоких подземных вод. *С. С. Бондаренко, Л. А. Лубенский, А. Т. Печерин, В. П. Стрепетов, А. А. Шпак* 399
Обоснование параметров кондиций. *С. С. Бондаренко, Л. А. Лубенский, В. П. Стрепетов, А. А. Шпак* 405
Денежная оценка месторождений. *Л. А. Лубенский, В. П. Стрепетов, А. А. Шпак* 413
Пример геолого-экономической оценки месторождения промышленных подземных вод. *Л. А. Лубенский* 414

Часть IV

ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫЕ И ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ СССР

Глава 12. **Общие закономерности распространения и ресурсы промышленных вод.** *С. С. Бондаренко, Н. М. Елманова, В. А. Комягина, В. М. Попов* 421

Глава 13. **Прогнозные ресурсы и эксплуатационные запасы основных типов минеральных вод СССР.** *Г. С. Вартанян, В. П Кривошеев, Р. И. Плотникова* 433

Провинция хлоридных натриевых (кальциевых) преимущественно метановых и азотно-метановых минеральных вод 433
Провинция углекислых минеральных вод 435
Провинция азотных терм 447

Глава 14. **Ресурсы теплоэнергетических вод СССР.** *Г. К. Антоненко, Т. Б. Гребенщикова, Б. Ф. Маврицкий, Н. С. Отман, А. А. Шпак* . . . 450

Пластовые водонапорные системы 452
Трещинные водонапорные системы 464
Заключение. *С. С. Бондаренко, Г. С. Вартанян, А. А. Шпак* 473

Список литературы 475

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Редакторы издательства *Н. В. Венгерцева, Р. В. Добровольская*
Переплет художника *И. А. Слюсарева*
Художественный редактор *Г. Н. Юрчевская*
Технические редакторы *А. В. Трофимов, Л. Н. Шиманова*
Корректор *В. Т. Юдович*

ИБ № 6768

Сдано в набор 17.03.86. Подписано в печать 23.07.86. Т-16159. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура Литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 30,0. Усл. кр.-отт. 30,0. Уч.-изд. л. 35,13. Тираж 2000 экз. Заказ 893/552—2. Цена 2 р. 10 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»,
103633, Москва, Третьяковский проезд, 1/19
Ленинградская картографическая фабрика ВСЕГЕИ
Отпечатано в типографии № 2 Ленуприздата.
191104, Ленинград, Литейный пр., 55. Заказ 1961