

Несейсмические и аэрометоды

Новые подходы к 3D моделированию поля силы тяжести при подсчете запасов на месторождениях сульфидных полиметаллических руд на примере данных по Большому Кавказу

Advanced 3D modelling of gravity field unmasks reserves of a pyrite-polymetallic deposit: a case study from the Greater Caucasus

Л. В. Эппельбаум¹ и Б. Е. Хезин² представляют результаты своих работ на рудных месторождениях Большого и Малого Кавказа с применением современных методов 3D моделирования гравимагнитных полей

Анализ применения гравиразведки на рудных месторождениях (Davis *et al.* 1957; Frasheri *et al.* 1997; Hansen, 2001; Hearst & Morris, 2001; Jorgensen, 2000; Khesin *et al.* 1993; Kleinkopf *et al.* 1991; Nabighian & Asten, 2002; Parasnis, 1997; Yarosh & Polyakov, 1963 и др.) показывает, что этот метод играет важную роль при определении положения рудных тел. Этот метод эффективен, поскольку между рудными телами и вмещающими породами существует значительный контраст плотностей. В то же время детальные съемки поля силы тяжести в горных районах, где обычно находятся рудные месторождения, затруднено по ряду разнообразных причин.

Типичные рудные месторождения обычно находятся в деформированных областях, для которых характерно наличие разнообразных тектонических структур и геологических тел с различными физическими свойствами. Влияние рельефа местности также является сильным возмущающим фактором. Все эти аспекты затрудняют выделение и интерпретацию аномалий поля силы тяжести. (Jorgensen, 2000; Khesin *et al.* 1996; Steinhouser *et al.* 1990).

Трехмерное моделирование поля силы тяжести рассматривается во многих работах. Среди публикаций недавнего времени можно отметить: Boulanger & Chouteau (2001); Chakravarthi & Sundararajan (2004); Furness (2000); Gallardo-Delgado *et al.* (2003); Holstein, H. (2003); Mauriello & Patella (2001); Zhang *et al.* (2004).

В настоящей статье говорится об успешном применении авторами 3D моделирования гравимагнитных полей к данным по нескольким месторождениям руд Большого и Малого Кавказа. Впервые эффективность расчета влияния рельефа местности в ходе трехмерного физико-геологического моделирования была показана в ходе комплексных геофизических работ на месторождении золотых и сульфидных руд Кызылбулах (рудный район Мехмана, Большой Кавказ) (Khesin *et al.* 1993). Ниже рассмотрен самый яркий пример анализа поля силы тяжести, относящийся к Катехинскому месторождению (Белокань-Закатальский рудный район, север Азербайджана)

Геологическое строение

Катехинское месторождение сульфидных полиметаллических руд расположено на южном склоне Большого Кавказа (север Азербайджана) в области с сильно изрезанным рельефом местности (рис. 1). По данным треста «Азербайджангеология» геологический разрез территории сложен в основном переслаиванием песчано-глинистых пород верхнеалейского возраста. Катехинское месторождение состоит из двух слоев, представленных субпараллельными пластообразными телами. Все известные рудные тела, пригодные для промышленной разработки, имеют тектонические границы. Преобладающий морфологический тип рудных тел - линзовидные. Многочисленные субширотные и субмеридиональные разрывы сильно осложняют этот тип, и тела превращаются в набор столбообразных объектов. Катехинское месторождение исследовано бурением и горными выработками на глубину до 500 м. Некоторые специалисты, тем не менее, указывают, что в связи со сложной тектонической обстановкой в ходе этих работ не удалось полностью установить границы рудных тел.

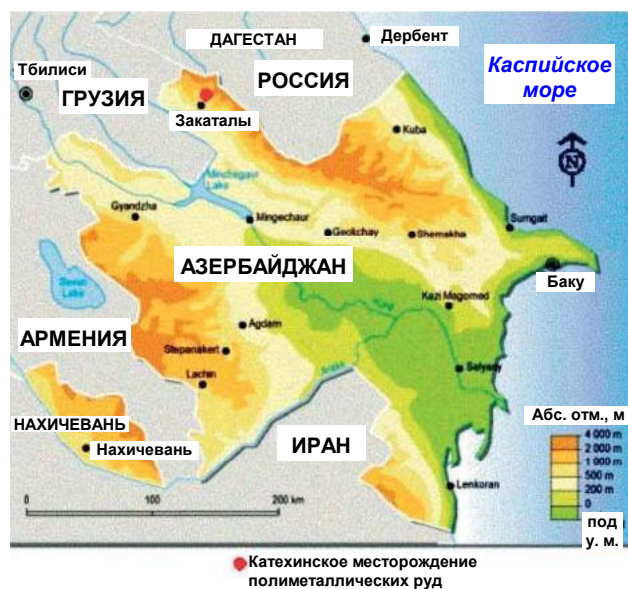


Рис. 1. Физическая карта Азербайджана с обозначением Катехинского месторождения

¹Dept. of Geophysics and Planetary Sciences, Raymond and Beverly Sackler Faculty of Exact Sciences, Tel Aviv University, Ramat Aviv 69978, Tel Aviv, Israel; E-mail: lev@frodo.tau.ac.il

²Dept. of Geological and Environmental Sciences, Ben Gurion University of the Negev, Be'er-Sheva, P.O. Box 653, Israel; E-mail: khesin@bgumail.bgu.ac.il

Несейсмические и аэрометоды

Для руд Катехинского месторождения выявлено три типа текстур: (1) массивные, (2) жильно-обломочные и (3) рассеянно-вкрапленные. Главными рудными минералами на месторождении являются пирит, сфалерит, халькопирит и галенит. Акцессорные минералы представлены гепатит-пиритом, вюрцитом, арсенопиритом, и мельниковитом; имеются также редкие металлы – серебро и золото (Мехтиев и др., 1976; Зайцева и др., 1988).

Программы для 3D моделирования

гравимагнитных полей

Программа GSFC (Geological Space Field Calculation, вычисление полей в геологическом пространстве) разработана для решения специфических задач 3D гравимагниторазведки в сложных геологических условиях (Khesin *et al.* 1996). Программ предназначена для расчета полей Δg (как в редукциях Буге и Фая, так и результатов наблюдений), ΔZ , ΔX , ΔY , ΔT , а также вторых производных потенциала силы тяжести, в условиях расчлененного рельефа и косой намагниченности. Геологический разрез аппроксимируется:

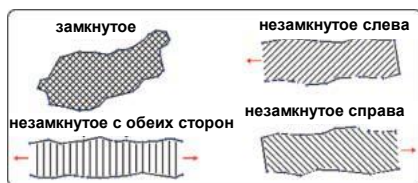


Рис. 2. Типы геологических тел в моделях

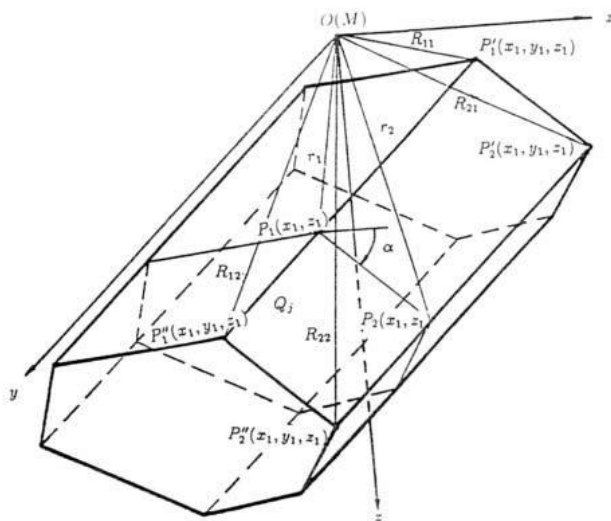


Рис. 3. Расчет производных потенциала силы тяжести для горизонтальной многогранной призмы

(1) трехмерными телами, (2) телами, полубесконечными по падению, а также (3) телами, бесконечными по простиранию, сечение которых может быть замкнуто или незамкнутыми с одной стороны или с обеих сторон (рис. 2). Геологические тела аппроксимируются горизонтальными многогранными призмами (рис. 3).

Программа имеет еще ряд достоинств: (1) одновременный расчет поля силы тяжести и магнитного поля; (2) описание рельефа местности значениями высот произвольно заданных точек; (3) расчет эффектов границы «земля-воздух» методом выбора непосредственно в ходе интерпретации; (4) моделирование по заданным профилям с учетом рельефа или на переменной высоте (высоты на профиле задаются по точкам); (5) одновременный расчет по нескольким профилям; (6) описание большого числа геологических тел и фрагментов.

В основе алгоритма GSFC лежит решение 3D прямой задачи гравимагниторазведки для многогранной призмы, ограниченной по простиранию (рис. 3). В алгоритме интегрирование по объему сводится к интегрированию по поверхности аномалиеобразующего тела.

Аналитическое выражение первой вертикальной производной потенциала силы тяжести (m-1)-угольной призмы (рис. 3) получено интегрированием общего аналитического выражения:

$$U_z = - \int_s \frac{z}{(R+y)R} dx dz \Big|_{y_1}^{y_2},$$

где $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, S – площадь поперечного сечения плоскостью xOz . Детальное описание аналитических выражений первой и второй производных потенциала силы тяжести для модели горизонтальной многогранной призмы и их связь с магнитным полем представлены в работе Хезина (Khesin *et al.*, (1996).

Результаты 3D моделирования поля силы тяжести

Комбинированное 3D моделирование поля $\Delta g_{Bouguer}$ (поле силы тяжести в редукции Буге) и магнитного поля ΔZ (вертикальной компоненты полного магнитного поля) выполнено по следующей схеме. По генерализованным данным Мехтиева (Мехтиев и др., 1977) и Зайцевой (Зайцева и др., 1988) была составлена детальная физико-геологическая модель Катехинского месторождения на участок длиной 800 м до глубины 400 м. Затем были использованы все доступные данные по плотности (Гаджиев и др., 1984) и магнитной восприимчивости (Исмаил-заде и др., 1983) пород. Для улучшения учета влияния рельефа местности составлена цифровая модель местности. В связи с наличием на территории Катехинского месторождения регионального тренда высот в направлении ЮЗ-СВ потребовалась цифровая модель местности (ЦММ) по прямоугольной сети на участок 20 км в длину и 600 м в ширину (геологический профиль длиной 800 м расположен в геометрическом центре ЦММ). ЦММ содержит 1000 точек, более частых в центре и с разрежением по краям.

Результаты первой итерации моделирования гравимагнитных полей показаны на рис. 4. Графики ΔZ and ΔU_{EP} (потенциал естественного электрического поля)

Несейсмические и аэрометоды

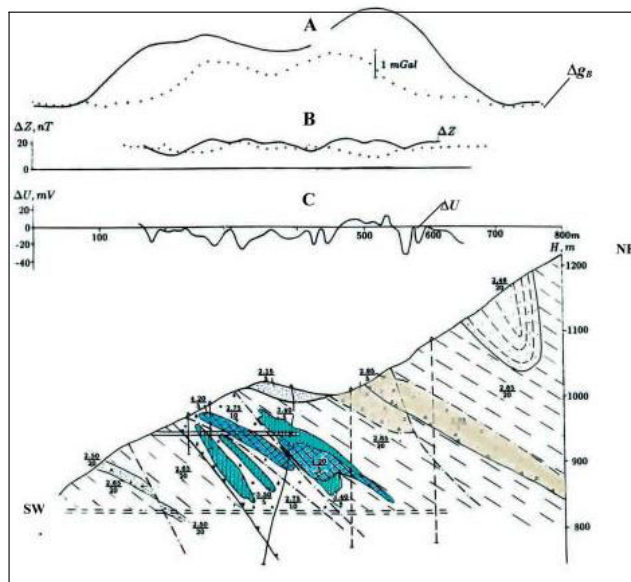


Рис. 4. Расчет поля силы тяжести (A) и магнитного поля (B) по известному геологическому разрезу Катехинского месторождения сульфидных полиметаллических руд. График (C) – результаты полевых работ методом ЕП; детали на рис. 5

колеблются около нуля и не дают полезной информации о целевых объектах на глубине. Это объясняется особенностями минерального состава руд Катехинского месторождения. В них практически отсутствует магнитный минерал пирротин, поэтому руды почти немагнитны. С другой стороны, значительное содержание руды замедляет течение окислительно-восстановительных процессов, необходимых для образования сильных аномалий ЕП. Таким образом, можно прийти к выводу, что существенная геофизическая информация может быть получена только из графика $\Delta g_{\text{Bouguer}}$.

Из сопоставления наблюдаемого и расчетного полей силы тяжести (рис. 4) следует, что в стартовой физико-геологической модели имеется дефицит аномальных масс. После примерно 25 итераций (расчетов 3D прямой задачи) получен результат, показанный на рис. 5. В юго-западной и северо-восточной частях месторождения выделены два массивных рудных тела, которых не было в исходной модели. Следует отметить, что вывод о наличии скрытых рудных тел соответствует результатам независимых изысканий, включавших подземные геотермические исследования и наземную геохимическую съемку. На участке 250-300 м штольни 8 в ходе подземных геотермических работ выявлена аномалия температуры $0.5^{\circ} - 0.8^{\circ} \text{C}$. На поверхности в прилегающей зоне размером 150-200 м отмечены существенные содержания свинца и цинка (согласно Гинзбургу (Гинзбург и др., 1981) и данным треста «Азербайджангеология»).

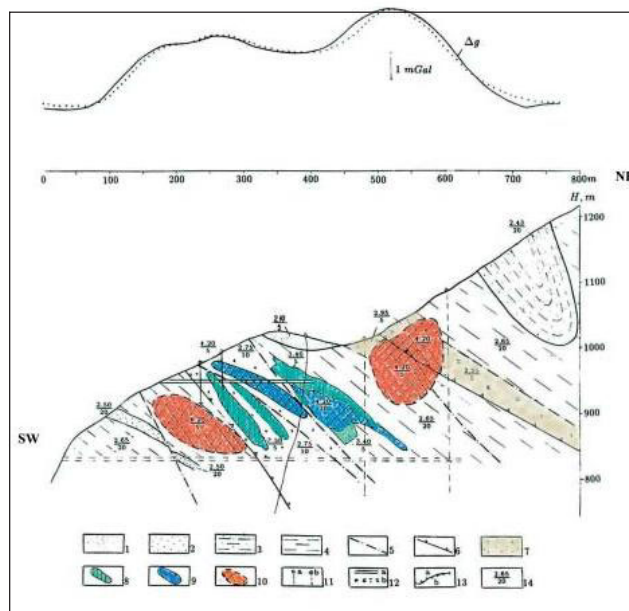


Рис. 5. Результаты 3D моделирования данных гравиразведки. (1) Рыхлые четвертичные отложения; (2-4) Средняя юра: (2) массивные тонко- и среднезернистые песчаники, (3) переслаивание аргиллитов и песчаников, (4) ритмическая толща алевритов и аргиллитов; (5) разрывные нарушения; (6) взбросы и надвиги; (7-9) сульфидные полиметаллические руды: (7) рассеянно-вкрапленные, (8) жильно-обломочные, (9) массивные; (10) рудные тела, введенные в модель в ходе расчетов; (11) разведочные скважины: (а) на профиле, (б) снесенные на профиль; (12) штольни: (а) в плоскости разреза, (б) снесенные на плоскость разреза; (13) графики поля силы тяжести и магнитного поля: (а) наблюдаемые (сплошные), (б) расчетные (пунктир); (14) физические свойства: числитель – плотность, г/см^3 , знаменатель – намагниченность, мА/м (1-9 и 11-12 приведены в соответствии с данными Зайцевой (Зайцева и др., 1988) и треста «Азербайджангеология»).

Заключение

Анализ поля силы тяжести может играть значительную роль в детальных исследованиях месторождений сульфидных полиметаллических руд. В отличие от методов магниторазведки и ЕП, требующих для успешного применения наличия магнитных минералов и окислительно-восстановительных процессов, для использования гравиразведки требуется значительное различие плотностных свойств сульфидных полиметаллических руд и вмещающих пород, которое практически всегда имеется. Сочетая доступные геологические и петрофизические данные с таким мощным инструментом, как решение 3D обратной задачи гравиразведки, удалось сделать переоценку запасов сульфидных полиметаллических руд на Катехинском месторождении, расположенного в местности со сложными рельефом и тектоникой на южном склоне Большого Кавказа..

Несейсмические и аэрометоды

Литература

- Boulanger, O. and Chouteau, M. [2001] Constrains in 3D gravity inversion. *Geophysical Prospecting* **49**, 265-280.
- Chakravarthi, V. and Sundararajan, N. [2004] Automatic 3-D gravity modeling of sedimentary basins with density contrast varying parabolically with depth. *Computers & Geosciences* **30**, 601-607.
- Davis, W.E., Jackson, W.H. and Richter, D.H. [1957] Gravity prospecting for chromite deposits in Camaguey Province, Cuba. *Geophysics* **22**, 848-869.
- Frasheri, A., Lubonja, L. and Alikaj, P. [1995] On the application of geophysics in the exploration for copper and chrome ores in Albania. *Geophysical Prospecting* **43**, 743-757.
- Furness, P. [2000] Computing three-dimensional gravitational fields with equivalent sources. *Geophysical Prospecting* **48**, 603-615.
- Гаджиев Т. Г., Каркошкин А. И., Хезин Б. Е., Алексеев В. В., Потапова Е. И., Салехли Т. М. Петрофизические и плотностные характеристики геологических ассоциаций Азербайджана. Изд-во «Азернешр», Баку. 1984. (Здесь и далее названия работ на русском языке приведены в обратном переводе – прим. перев.)
- Gallardo-Delgado, L.A., Perez-Flores, M.A. and Gomez-Trevi, E. [2003] A versatile algorithm for joint 3D inversion of gravity and magnetic data. *Geophysics* **68**, 949-959.
- Гинзбург С. и др. Подземные геофизические исследования рудных месторождений района Белокань-Закаталы. Отчет ЦНИГРИ. 1981.
- Hansen, R.O. [2001] Gravity and magnetic methods at the turn of the millennium. *Geophysics* **66**, 36-37.
- Hearst, R.B. and Morris, W.A. [2001] Regional gravity setting of the Sudbury structure. *Geophysics* **66**, 1680-1690.
- Holstein, H. [2003] Gravimagnetic anomaly formulas for polyhedra of spatially linear media. *Geophysics* **68**, 157-167.
- Измаил-заде Т. А., Гаджиев Т. Г., Хезин Б. Е., Каркошкин А. И., Алексеев В. В., Потапова Е. И. Петромагнитные свойства горных пород Азербайджана. Изд-во «Элм», Баку, 1983.
- Jorgensen, C. [2000] Gravity surveying and processing in difficult terrain: Greens Creek Mine, Alaska. *Trans. of 70th Ann. Internat. Mtg., Soc. of Expl. Geophys.*, 374-377.
- Khesin, B.E., Alexeyev, V.V. and Eppelbaum, L.V. [1993] Investigation of geophysical fields in pyrite deposits under mountainous conditions. *Journal of Applied Geophysics* **31**, 187-205.
- Khesin, B.E., Alexeyev, V.V. and Eppelbaum, L.V. [1996] *Interpretation of Geophysical Fields in Complicated Environments*. Kluwer Academic Publishers, Ser.: *Modern Approaches in Geophysics*, Boston - Dordrecht - London, 368 pp.
- Kleinkopf, M.D., Peterson, D.L. and Gott, G. [1970] Geophysical studies of the Cripple Creek Mining district, Colorado. *Geophysics* **35**, 3, 490-500.
- Leaman, D.E. [1991] Surface gravity and magnetic responses of mineralization, Mt. Isa, northwest Queensland, Australia. *Geophysics* **56**, 542-549.
- Mauriello, P. and Patella, D. [2001] Gravity probability tomography: a new tool for buried mass distribution imaging. *Geophysical Prospecting* **49**, 1-12.
- Мехтиев Ш. Ф., Гаджиев Т. Г., Кашкай М. А., Ахмедов А. М. Геология СССР. Т. XLVII. Азербайджанская ССР. М.: «Недра». 1976.
- Nabighian, M.N. and Asten, M.W. [2002] Metalliferous mining geophysics - State of the art in the last decade of the 20th century and the beginning of the new millennium. *Geophysics* **67**, 964-978.
- Parasnis, D.S. [1997] *Principles of applied geophysics*. 5th Ed., Chapman & Hall, London - N.Y. - Tokyo.
- Steinhouser, P., Meurers, B. and Ruess, D. [1990] Gravity investigations under extreme mountainous conditions. *Exploration Geophysics* **21**, 161-168.
- Ярош А. И., Поляков А. Б. Поиски и разведка медно-сульфидных месторождений на Урале с применением гравиразведки. М.: Гостеолтехиздат. 1963.
- Зайцева И. В., Нагиев И. В., Курбанов Н. К. и др. Детальная разведка Катехинского месторождения сульфидных полиметаллических руд. В 2-х томах. Трест «Азербайджангеология», 1988.
- Zhang, J., Wang, C-Y., Shi, Y., Cai, Y., Chi, W-C., Dreger, D., Cheng, W-B. and Yuan, Y.-H. [2004] Three-dimensional crustal structure in central Taiwan from gravity inversion with a parallel genetic algorithm. *Geophysics* **69**, 917-924.