

В.С.Портнов, М.П.Пузеева, А.Д.Маусымбаева

Карагандинский государственный технический университет

ГРАВИТАЦИОННАЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА НЕКОТОРЫХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА

Кен орындағы пайдалы қазбалардың болжам қорларының сандық бағасы — қосымша геологияның басты мәселесі. Ерте және қазіргі уақытта аймақтық дәрежедегі сияқты әлемдік масштабта да пайдалы қазба қорларының бағасымен байланысты жұмыстар пайда болады. Мақалада пайдалы қазбаларды гравитациялық және сейсмикалық барлау негізінде басты физикалық процестер қарастырылған. Потенциалдық өріс арасындағы аналогияны қолдана отырып, гравитациялық барлау кен орынның болжамдық қорларының формуласы алынған. Электрлік ток және жазық ортадағы серпінді толқын арасындағы аналогия бойынша сейсмикалық барлауда қолданылған кен орынның болжамдық қорларының формуласы алынды.

Quantitative estimation of stocks of minerals in deposits — the major problem of applied geology. Earlier and now there are the works connected with an estimation of stocks of minerals both at regional level, and in world scales. In work the basic physical processes underlying gravitational and seismic investigations of minerals are considered. Using analogy between potential fields, the formula for definition of predicted stocks of deposits where gravitational investigation was used is received. Using analogy between an electric current and elastic waves in the continuous environment, the formula for definition of predicted stocks of deposits where seismic investigation was used is received.

Введение

Гравитационная разведка — один из ведущих методов разведочной геофизики, нашедшей широкое применение при изучении геологического строения различных участков земной коры, выявлении нефте- и газоносных структур, поисках рудных месторождений.

При решении геологических задач прикладной гравиметрии изучается поле силы тяжести, связанное с распределением масс горных пород, слагающих верхние части земной коры.

В ряде наших работ использовался термодинамический подход к задачам магниторазведки, электроразведки и ядерно-физическим методам опробования рудных месторождений [1–6]. Это дало возможность теоретически обосновать закономерности влияния текстуры, структуры, минерального состава руд, глубины залегания и температуры на магнитную восприимчивость магнетитовых руд и ее связь с содержанием железа, что позволило ввести поправки в результаты измерений для повышения точности опробования. Получено аналитическое выражение для оценки прогнозных запасов магнетитовых руд на основе термодинамических параметров рудообразования, магнитной восприимчивости и геометрии рудных тел.

Связь магнитного и гравитационного потенциалов известна давно. Это дает возможность рассмотреть вопрос об использовании развитых нами термодинамических моделей к решению некоторых задач гравиразведки.

Сейсмическая разведка включает совокупность методов для изучения глубинного строения земной коры. Методы сейсморазведки основаны на изучении распространения в земной коре упругих волн, возбуждаемых искусственным путем.

Сейсморазведка применяется в основном для решения задач структурной геологии и поисков месторождений полезных ископаемых (нефть, газ, уголь, каменная соль), которые связаны с определенными структурами. Сейсморазведку применяют и для решения различных гидрогеологических и инженерно-геологических задач.

В настоящей работе рассмотрены вопросы использования данных сейсморазведки для подсчета прогнозных запасов угольных месторождений Центрального Казахстана.

Энергия рудообразования и оценка распределения запасов руд

Количественная оценка прогнозных запасов полезных ископаемых в месторождениях — важнейшая проблема прикладной геологии. Важные работы в этом направлении принадлежат таким ученым, как С.Дж. Ласки, А.М.Марголину, Н.И.Сафронову, Г.А.Булкину и ряду других.

Наиболее близким к предложенному нами методу является метод Н.И.Сафронова.

Полученная нами формула для подсчёта прогнозных запасов железа на магнетитовых месторождениях включает в себя только экспериментально определяемые величины. Тем не менее наш метод даёт значения величин, близких к методу Н.И.Сафронова.

Связь запасов металла и его содержания в руде отдельного месторождения известна геологам достаточно давно. С.Дж. Ласки [7] определил эту связь следующим образом:

$$C = \alpha - \beta \ln q; C_{\min} = \alpha - \beta(\ln q + 1), \quad (1)$$

где q — запасы металла данного месторождения; C и C_{\min} — среднее и бортовое содержание металла в руде; α и β — два параметра зависимости.

А.М.Марголин показал [8], что соотношения формулы (1) лучше всего соответствуют рудам, коэффициент вариации содержания которых близок к единице. При отклонениях от единицы зависимость формулы (1) также отклоняется от линейной. Марголин даёт следующее обобщение закона Ласки:

$$C = \int (C_{\min} - \bar{C}) dq/q + (C_{\min} - \bar{C}) + \text{const}. \quad (2)$$

При $\text{const} = \alpha$ и $C_{\min} - \bar{C} = \beta$ уравнение (2) совпадает с уравнением (1). Чтобы вычислить коэффициент α и β , используют корреляционный и регрессионный анализ данных о средних $C_{\text{ср}}$ и максимальных C_{max} содержаниях металла, с одной стороны, и суммарных его запасах q — с другой. При этом возникает проблема выбора распределения исходных данных, которую нельзя решить эмпирически. Поэтому следует обратиться к теоретическому рассмотрению причин существования указанных выше зависимостей.

Одна из наиболее успешных моделей определения прогнозных запасов руд, основанная на понятии энергии рудообразования, предложена Н.И.Сафроновым [9–10]. Понятие энергии рудообразования как одного из видов энергии концентрации получено на основе классической термодинамики идеального газа. Основные допущения этой модели следующие:

- рудообразование уподобляется процессу сжатия-разрежения в «атмосфере» физических элементов, которая обладает свойствами идеального газа;
- процесс гидротермального рудообразования считается изотермическим при температуре 400 °С (673 К);
- термодинамическая активность ионов, комплексов или других компонентов, участвующих в рудообразовании, принимается равной их атомному содержанию в единице объема;
- способность всех элементов к концентрации в рудах принимается одинаковой и равной единице;
- причиной рудоотложения считается изменение температур на пути миграции рудообразующих растворов.

Основная формула для определения затраты энергии на сжатие-разрежение «атмосферы» рудоносной изотермы в расчете на один элемент, на выбранную единицу объема и на μ_3 молей вещества, вовлеченного при этом в процесс, имеет следующий вид:

$$\Delta F = \mu_3 T \Delta S = \mu_3 RT \ln K, \quad (3)$$

где $K = C/C_0$ (для сжатия) и $K = C_0/C$ (для разрежения), а C_0 и C — начальное и конечное содержание элемента в единице объема, моль; R — универсальная газовая постоянная.

Концентрацию данного элемента в смеси можно выразить через его атомную концентрацию C_a . Вводя понятие о к.п.д., можно положить этот параметр пропорциональным C_a , причем C_a следует отнести к моменту равновесия. Полная энергия имеет вид

$$\Delta F_n = \Delta F / \text{к.п.д.} = \mu_3 RT \ln K / C_a, \quad (4)$$

при сжатии и разрежении соответственно:

$$C_a = \frac{\mu_3'}{\sum \mu_3}, \quad C_a = \frac{\mu_3''}{\sum \mu_3}, \quad (5)$$

где μ_3' , μ_3'' — количество молей в единице объема породы, по которой происходит рудообразование, и руды, соответственно, при «сжатии» и «разрежении»; $\sum \mu_3$ — число молей вещества, вовлеченных в процесс рудообразования.

Совершенно очевидно, что при «сжатии» $\mu_{\text{э}} = \mu'_{\text{э}} K$, при «разрежении» $\mu_{\text{э}} = \mu''_{\text{э}} / K$. Подставляя $\mu_{\text{э}}$ и C_a в общую формулу, получаем:

$$\Delta F_n = RTK \ln K \sum \mu_{\text{э}}, \quad (6)$$

По формуле (6) можно при заданном K рассчитать полную затрату рудообразующей энергии на один данный элемент в смеси и на выбранную единицу объема. Поскольку реальными коэффициентами рудообразования мы не располагаем, то Н.И.Сафронов принимает коэффициенты $R, T, \sum \mu_{\text{э}}$ для всех элементов одинаковыми, равными единице. Тогда формула (6) предельно упрощается и принимает вид

$$\Delta F_n = K \ln K. \quad (7)$$

Используя представления Больцмана о термодинамической вероятности и ее связи с энтропией для дифференцированного запаса руды главного элемента при данном содержании его в кларках концентрации в руде K , Н.И.Сафронов получает уравнение:

$$P_K = \frac{E_K}{E_n} = \frac{1/K}{\sum_i K_i \ln K_i}, \quad (8)$$

где числитель — общий расход энергии на образование руд градации K (по Больцману); знаменатель — расход энергии на образование единицы объема руды градации K (по термодинамике идеальных растворов).

Если расходами энергии на сжатие-разрежение второстепенных элементов, по сравнению с главным металлом, пренебречь, то дифференцированные запасы P_K в единице объема:

$$P_K = \frac{1/K_M}{K_M \ln K_M}, \quad (9)$$

где K_M — кларк концентрации главного металла.

Для перехода при расчете на металл учтем, что его количество в единице объема пропорционально K_M .

Итак, при расчете на металл:

$$P_K = \frac{1}{K_M \ln K_M}. \quad (10)$$

При расчетах исходное содержание металла в рудах в весовых процентах предварительно необходимо перевести в кларки концентрации в единице объема. Формула (10) проста и очень удобна для дальнейшего использования, в частности, для расчета интегральных запасов по интервалам кларков концентраций. Для этого проинтегрируем выражение

$$P_K = \int_{K_i}^{K_m} \frac{dK}{K \ln K} = \ln \ln K \Big|_{K_i}^{K_m}, \quad (11)$$

где m — конечное содержание элемента.

Поля-аналоги

Во многих областях техники и физики встречаются явления, представляющие собой прямые аналоги процессов в электрическом и магнитном поле (табл. 1). Ниже мы будем использовать метод аналогий и таблицу 1.

Т а б л и ц а 1

Аналогия между величинами в потенциальных полях

Параметр	Электростатическое поле	Электрического тока поле	Магнитостатическое поле	Тепловое поле
1	2	3	4	5
Потенциал	Потенциал U	Потенциал U	Потенциал Ω	Температура T
Градиент	Напряженность электрического поля E	Напряженность электрического поля E	Напряженность магнитного поля H	Градиент температуры $\text{grad}T$

1	2	3	4	5
Постоянная, характеризующая свойства среды	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Электрическая проводимость σ	Магнитная проницаемость μ	Температуропроводность a
Плотность потока	Электрическое смещение \mathbf{D}	Плотность тока \mathbf{j}	Магнитная индукция \mathbf{B}	Плотность теплового потока \mathbf{q}
Интенсивность источника	Плотность заряда ρ_e	Плотность тока \mathbf{j}	Плотность магнитной массы ρ_m	Плотность источника тепла Q
Проводимость поля	Емкость C	Электрическая проводимость G	Магнитная проводимость Λ	Тепловая проводимость

Термодинамический метод

В работе [2] с целью анализа влияния различных факторов на результаты магнитных измерений нами предложена физическая модель магнитного железосодержащего минерала с использованием методов статистической неравновесной термодинамики. В этой модели атомы железа, связанные с магнетитом (в общем случае, с любым магнитным минералом), рассматриваются как система невзаимодействующих магнитных диполей, погруженная в термостат (рудовмещающие породы). Квантовые переходы, обусловленные взаимодействием магнитных диполей с термостатом, будут диссипативными (с вероятностью P), в отличие от взаимодействия с внешним магнитным полем (с вероятностью F). Диссипативные процессы приводят к тому, что вторичное поле меньше первичного. Функция отклика системы (измеряемая физическая величина — \mathfrak{a} , Э.Д.С. и т.д.) $\Phi = F/F + P$. Для вероятности диссипативных процессов получено

$$P = \frac{2\Delta S}{k\tau} \exp\left\{-\frac{E_m - G^0 / \bar{N}}{kT}\right\}, \quad (12)$$

где ΔS — изменение энтропии при квантовом переходе; E_m — среднее значение энергии основного состояния магнитных диполей; τ — время одночастичной релаксации ($\tau \approx 10^{-12}$ с); \bar{N} — среднее число магнитных диполей; G^0 — энергия Гиббса термостата; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Учитывая, что $\exp\{-E_m/kT\} \approx 1$, а $F = 1/\tau_p$, τ_p — «радиационное» время жизни возбужденного состояния ($\tau_p \approx 10^{-15}$ с), для функции отклика подсистемы магнитных диполей получаем выражение:

$$\Phi = \left(1 + \frac{2\Delta S}{k} \frac{\tau_p}{\tau} \exp\left(\frac{G^0 / \bar{N}}{kT}\right)\right)^{-1}. \quad (13)$$

Гравитационная разведка и прогнозные запасы угля

Чтобы проиллюстрировать термодинамический подход к задачам гравиразведки, будем использовать сферическую модель Земли и пренебрежем вкладом центробежной силы. Такие допущения не сказываются на результатах анализа.

Пусть мы наблюдаем аномалию Δg , обусловленную залежью какого-либо минерала с концентрацией C_M .

В этом случае величина, обратная гравитационной постоянной, будет равна:

$$\frac{1}{f} = \frac{M_3}{gR_3^2} = \frac{\alpha}{g}, \quad \alpha = \frac{M_3}{R_3^2} = \text{const}, \quad (14)$$

где M_3 , R_3 — масса и радиус Земли.

Величине, обратной гравитационной постоянной, соответствует магнитная восприимчивость (см. табл. 1), для которой мы получили следующее выражение [2]:

$$\mathfrak{a} = A \frac{C_M}{G^0}. \quad (15)$$

Тогда имеем следующую цепочку равенств:

$$\begin{aligned} \alpha &= A \frac{C_M}{G^0} = \phi \frac{1}{f} = \phi \frac{\alpha}{g}, \text{ или} \\ \frac{g}{\phi \alpha} &= \frac{G^0}{AC_M}, \text{ или} \\ \Delta g &= B \frac{\Delta G^0}{C_M}, \quad B = \frac{\phi \alpha}{A} = \text{const.} \end{aligned} \quad (16)$$

Для дифференцированных запасов получим формулу:

$$P_k = \frac{1}{\ln(q_s \Delta g)} \cdot 100 \%, \quad (17)$$

где $q_s = 1002473$.

В качестве примера в таблице 2 представлены результаты расчета по формуле (17) прогнозных ресурсов некоторых угольных месторождений Казахстана, где проводилась гравirazведка.

Т а б л и ц а 2

Прогнозные и разведанные запасы некоторых угольных месторождений Казахстана

Месторождение	Прогнозные запасы (млн. тонн)	Разведанные запасы (млн. тонн)
Тениз-Коржункольское	2243	355
Борлы	1760	478
Куучек	3140	636
Майкюбинское	5500	3647

Сейсмическая разведка и прогнозныe запасы угля

Скорости распространения продольных ϑ_p и поперечных ϑ_s волн в зависимости от упругих свойств и плотности ρ среды определяются соотношениями

$$\vartheta_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (18)$$

$$\vartheta_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}}. \quad (19)$$

Отношение $\vartheta_p / \vartheta_s = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}}$ показывает, что продольные волны распространяются быстрее поперечных. Для большинства горных пород $\mu = 0,2-0,4$, поэтому $\vartheta_p / \vartheta_s = 1,6-2,4$. Применим теперь наш термодинамический подход, используя аналогию между электрическими и акустическими системами, представленную в таблице 3.

Т а б л и ц а 3

Аналогия между электрическими и акустическими переменными и параметрами

Электрическая система	Акустическая система
Напряжение V	Давление P
Ток I	Скорость частиц v
Заряд e	Смещение u
Индуктивность L	Плотность среды ρ
Емкость C	Акустическая емкость $C_A = 1/\tau$
Сопротивление R	Акустическое сопротивление R_A

Для нас представляет интерес скорость частиц v , которая и является основой сейсморазведки. Ей соответствует ток I , который согласно закону Ома пропорционален электропроводности σ и обратно

пропорционален удельному сопротивлению. Для прогнозных запасов минерального сырья, используя данные сейсморазведки, мы получаем следующее выражение:

$$P_{\kappa} = \frac{1}{\ln(q_6 \vartheta)} \cdot 100 \%, \quad (20)$$

где q_6 вычисляется по аналогичной процедуре, как и в случае $q_1 - q_5$. В результате имеем $q_6 = 26,03$.

В качестве примера в таблице 4 представлены результаты расчета прогнозных дифференцированных ресурсов по формуле (20) для уже рассчитанных нами угольных свит Карагандинского угольного бассейна по данным электроразведки. При этом нами использовались данные сейсмических исследований Б.М.Кенжина [11].

Т а б л и ц а 4

Прогнозные дифференцированные запасы угля основных свит Карагандинского угольного бассейна

Свита	Дифференцированные запасы (%) по v (м/с)	Дифференцированные запасы (%) по ρ (Ом·м)
Долинская	14,6	14,2
Тентекская	15,1	14,5
Карагандинская	14,4	14,3
Ашлярикская	13,6	13,4

Видно, что оба метода неплохо согласуются между собой в пределах ошибок эксперимента.

Площадь Карагандинского угольного бассейна равна примерно 3600 км², глубина залегания пластов 2200–2400 м, среднее удельное сопротивление $\rho = 130,4$ Ом·м.

Прогнозные запасы получаются равными 111672 млн. тонн, а разведанные — 60317 млн. тонн, т.е. почти в два раза больше, чем разведанные. Частично такое расхождение связано с различием в расчетах промышленной углелотности. Максимальная промышленная углелотность на участках распространения всех четырех продуктивных свит составляет 103 млн. тонн на 1 км², а по кондициям 1960 г. (которые приняты сейчас) — 71 млн. тонн на 1 км², т.е. различие примерно в 1,5 раза.

Заключение

Поиски большинства полезных ископаемых в большинстве случаев ограничивались открытием месторождений по видимым ореолам рассеяния и другим визуально наблюдаемым поисковым признакам. Фонд таких «легко открываемых» месторождений быстро сокращается. Наряду с этим в последнее время становится очевидным наличие огромного количества так называемых «трудно открываемых» месторождений. Ориентировочные расчеты показывают, что общий фонд трудно открываемых месторождений по большинству полезных ископаемых во много раз превышает ресурсы легко открываемых месторождений. К этому нужно добавить, что запасы открытых и даже эксплуатируемых месторождений могут существенно превышать разведанные.

В связи с этим и ранее, и в настоящее время появляются работы, связанные с оценкой запасов полезных ископаемых как на региональном уровне, так и в мировых масштабах.

Авторы надеются, что предложенные в настоящей работе формулы для оценки прогнозных запасов угольных месторождений окажутся полезными для геологов, геофизиков, для работников угольной промышленности, преподавателям и студентам соответствующих специальностей.

Список литературы

1. Портнов В.С., Юров В.М. Прогнозные запасы железорудных месторождений Казахстана // Промышленность Казахстана. — 2004. — № 12. — С. 82–83.
2. Портнов В.С., Юров В.М. Связь магнитной восприимчивости магнетитовых руд с термодинамическими параметрами и содержанием железа // Известия вузов. Горный журнал. — Екатеринбург, 2004. — № 6. — С. 122–126.
3. Пузеева М.П., Портнов В.С., Юров В.М. Термодинамические модели в электроразведке полезных ископаемых // Естественно-гуманитарные науки и их роль в реализации программы индустр. инновац. развития РК: Тр. 111 междунар. конф. — Алматы, 2007. — С. 54–56.
4. Юров В.М., Портнов В.С., Пузеева М.П. Способ определения прогнозных запасов магнетитовых месторождений // Положительное решение на выдачу патента РК от 03.07.2008 г. Заявка № 2007/0785.1.

5. Пузеева М.П., Портнов В.С., Юров В.М. Использование ядерно-физических методов для подсчета прогнозных запасов руд // Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование: Сб. тр. 5-й междунар. науч. конф. — Алматы, Казак ун-ті, 2007. — С. 110.
6. Пузеева М.П., Портнов В.С., Юров В.М. Использование геофизических данных и физических свойств минералов при подсчете запасов минерального сырья // Комплексная переработка минерального сырья: Материалы междунар. науч. конф. — Караганда, 2008. — С. 665–669.
7. Lasky S.G. How tonnage and grade relation help predict ore reserves // Eng. and Min. J. — 1951. — Vol. 151. — № 4. — P. 81–85.
8. Марголин А.М. Оценка запасов минерального сырья. Математические методы. — М.: Недра, 1974. — 264 с.
9. Сафронов Н.И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. — Л.: Недра, 1971. — 212 с.
10. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. — Л.: Недра, 1978. — 215 с.
11. Кенжин Б.М. Вибрационно-сейсмические источники для динамического воздействия на угольный массив. — Караганда: Арко, 2009. — 297 с.