

УДК 550.83:553.43/574/

ОЦЕНКА ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

¹Портнов В.С., ²Юров В.М., ¹Турсунбаева А.К., ¹Умбетова А.Т.

¹Карагандинский государственный технический университет, Караганда;

²Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Караганда, e-mail: g.duganova@kstu.kz

В рамках неравновесной статистической термодинамики установлена связь между концентрацией полезного компонента в руде с ее физическими свойствами. На основе этой связи получены формулы для расчета дифференцированных и прогнозных ресурсов месторождений полезных ископаемых с использованием результатов геофизических исследований методами: магниторазведка, электроразведка, сейсморазведка и селективный гамма-гамма метод. Проведено сравнение рассчитанных прогнозных ресурсов с разведанными для ряда месторождений Казахстана. Предложенный метод позволяет выполнить прогнозную оценку запасов месторождений на ранних стадиях разведки с использованием результатов геофизических методов, при этом он обладает экспрессностью и достаточной точностью.

Ключевые слова: неравновесная термодинамика, геофизические методы, прогнозные ресурсы, месторождения полезных ископаемых

ESTIMATING PROGNOSTIC RESOURCES OF MINERAL DEPOSITS GEOPHYSICAL METHODS

¹Portnov V.S., ²Yurov V.M., ¹Tursunbaeva A.K., ¹Umbetova A.T.

¹Karaganda State Technical University, Karaganda;

²Karaganda State University named after E.A. Buketov, Karaganda, e-mail: g.duganova@kstu.kz

Within the framework of nonequilibrium statistical thermodynamics communication between concentration of a useful component in ore with his physical property is received. On the basis of this communication formulas for calculation of the differentiated and predicted stocks of deposits of minerals are received on the basis of the geophysical data. Methods of magnetic investigation, electric investigation, gravitational investigation and seismic prospecting, and also nuclear physical methods are considered. For each method formulas for calculation of predicted stocks of minerals are received and their comparison with the reconnoitered stocks for lines of deposits of Kazakhstan is lead. The offered method allows to make predicted estimation of deposit resources on early stage of prospects with using the results of geophysical methods, possesses small time of measurement and sufficient accuracy.

Keywords: nonequilibrium thermodynamics, the geophysical methods, predicted resources, deposits of minerals

С начала 50-х годов прошлого столетия интенсивно разрабатываются прямые геохимические методы количественного определения прогнозных запасов руд. Из обзора их тридцатилетнего развития [Булкин, 1984] следует, что геофизические методы традиционно относились к косвенным способам количественной оценки прогнозных запасов руд. С тех пор новых основополагающих идей не появилось, но бурное развитие получили методы компьютерного моделирования прогноза запасов, основанные на математически и термодинамически согласованном использовании геолого-геохимических и геофизических данных.

В настоящей работе мы предлагаем прямые геофизические методы количественного определения прогнозных запасов месторождений полезных ископаемых (не только руд). В работе используется метод аналогий, но не в том смысле, в котором он применяется в геологии. В геологии он основан на знаниях о геологии, взаимосвязях признаков оруденения того или иного месторождения. Нами используется аналогия

между физическими скалярными полями и характеризующими их параметрами.

Одна из наиболее успешных, на наш взгляд, моделей определения прогнозных запасов руд, основанная на понятии энергии рудообразования, предложена Н.И. Сафроновым [Сафронов, 1971; Сафронов и др., 1978]. Используя представления Больцмана о термодинамической вероятности и ее связи с энтропией, Сафроновым Н.И. получено уравнение для расчета дифференцированного запаса руды при данном содержании главного элемента K :

$$P_k = \frac{E_k}{E_{\Pi}} = \frac{1/K}{\sum_i K_i \ln K_i}, \quad (1)$$

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, пре-

небрежь, то дифференцированные запасы в единице объема определяются так:

$$P_K = \frac{1/K_M}{K_M \ln K_M}. \quad (2)$$

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:

$$P_K = \frac{1}{K_M \ln K_M}. \quad (3)$$

Применение статистической неравновесной термодинамики к анализу геофизических данных

Чтобы измерить какое-либо физическое свойство геологического объекта нужно воздействовать на него каким-либо первичным полем (магнитным, электрическим и т.д.) и измерить вторичное поле (отклик системы), величина которого несет информацию об объекте. Поскольку процесс взаимодействия объекта с полем обычно протекает довольно быстро (время одночастичных релаксаций $\sim 10^{-12}$ с), ясно, что процесс этот далек от равновесного. С другой стороны, характеристики вторичного поля несут информацию об объекте, находящемся в определенных термодинамических условиях и обладающим термодинамическими параметрами, которые непосредственно связаны с его структурными, химическими и физическими свойствами. Таким образом, с помощью неравновесной статистической термодинамики можно попытаться найти связь между микроскопическими (квантовыми) процессами взаимодействия первичных полей (параметры которых можно контролировать и изменять в широких пределах) с макроскопическими характеристиками геологического объекта. Именно такой подход и реализован нами применительно к магнитным измерениям [Портнов, Юров, 2004].

Рассмотрим железо, связанное с магнетитом, как систему невзаимодействующих магнитных диполей, погруженную в термостат, представляющий собой 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 Z_2 всегда меньше первичного Z_1 .

Поскольку подсистема магнитных диполей обменивается с термостатом только

энергией, то соответствующий им ансамбль частиц будет каноническим [Китель, 1977]. Статистическая интерпретация энтропии Больцмана принимает вид:

$$S = -k \sum_i f_i \ln f_i, \quad (4)$$

где f_i – функция распределения; k – постоянная Больцмана.

Дифференцируя (4) по времени и преобразуя, получим:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{k}{2} \sum_{i,j} (lhf_i - \ln f_j) (P_{ij} f_i - P_{ji} f_j), \quad (5)$$

где P_{ij} – вероятность перехода из начального i (с энергией E_i) в возбужденное состояние j (с энергией E_j).

Для диссипативных процессов принцип детального равновесия имеет вид:

$$\frac{g_i P_{ij}}{g_j P_{ji}} = e^{\frac{E_j - E_i}{kT}},$$

где g_i, g_j – статистические веса для уровней E_i и E_j .

Тогда (7) примет вид:

$$\frac{dSk}{dt} = \frac{P_{ij}}{2} (\ln f_i - \ln f_j) \left(f_i - \frac{g_i}{g_j} f_j e^{\frac{E_i - E_j}{kT}} \right).$$

Каноническая функция распределения:

$$f_{ij} = \frac{1}{Z} e^{-E_{ij}/kT},$$

где статистическая сумма:

$$Z = e^{-G/kT},$$

здесь G – потенциал (свободная энергия) Гиббса системы термостат (вмещающие породы) + система магнитных диполей (магнетитовая руда).

Примем, что не конфигурационная часть потенциала Гиббса линейно зависит от концентрации N магнитных диполей:

$$e^{-G/kT} = \sum_N h(N),$$

где $h(N) \omega(N) \cdot e^{-G/kT}$; $\omega(N)$ – статистический вес.

Опуская промежуточные вычисления, которые подробно изложены в работе [Портнов, Юров, 2004], запишем выражение для функции отклика системы магнитных диполей:

$$\Phi = \left(1 + \frac{2\Delta S}{k} \frac{\tau_p}{\tau} \exp\left(\frac{G^0/N}{kT}\right) \right)^{-1}, \quad (6)$$

где ΔS – изменение энтропии в диссипативном процессе; τ – время релаксации; τ_p – время жизни возбужденного состояния; G^0 – термодинамический потенциал термо-

стата; N – число магнитных диполей в единице объема вещества; k – постоянная Больцмана; T – температура.

В качестве функции отклика можно брать измеряемую величину в том или ином геофизическом методе (магнитная восприимчивость, электрическая проводимость и т.д.). Для перехода к весовой концентрации железа, связанного с магнетитом C_{Fe}^{Mf} , воспользуемся соотношением:

$$N = N_A \cdot \frac{C_{Fe}^{Mf}}{100\%},$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро.

Если в качестве функции отклика в формуле (6) взять коэффициент отображения K в методе искусственного подмагничивания (или магнитную восприимчивость), то после линеаризации (6) и вычисления всех величин, получаем следующее корреляционное уравнение для железа, связанного с магнетитом (C_{Fe}^{Mf}):

$$K = 13,86 \cdot 10^3 \frac{C_{Fe}^{Mf}}{G^0}.$$

Для магнетита $G^0 = 1,014 \cdot 10^6$ Дж·моль⁻¹ [Булах А., Булах К., 1978]:

$$C_{Fe}^{Mf} = 72,2 K, \% \quad (7)$$

Для Кентобинского, Сарбайского, Куржункульского и Соколовского месторождений экспериментально получены уравнения связи, позволяющие определять содержание железа в магнетитовых рудах с погрешностью не более $\pm 2,3\%$ абс. по результатам построения качественных (сортовых) планов горизонтов карьеров еще до бурения взрывных скважин, по которым выполняется геологическое и геофизическое опробование. Построение таких планов позволяет управлять добычными работами с целью обеспечения заданных качественных показателей руды, снижения разубоживания и потерь.

Уравнение связи (7) для $C_{Fe}^{Mf} = f(K)$ достаточно хорошо согласуется с экспериментальными. Максимальное отклонение для Соколовского месторождения от соотношения (7) равно 9,8%. Это связано с присутствием в этих рудах титаномагнетита и отличием энергии Гиббса минералов вмещающей среды каждого месторождения. Тем не менее теоретическое уравнение связи (7), полученное из первых принципов, не связанное с химическими анализами, дает возможность произвести оценку запасам магнетитового железа.

Использование данных каротажа магнитной восприимчивости для оценки прогнозных ресурсов железных руд

Сделаем объединение развитых выше идей с моделью подсчета запасов руд Саф-

ронова Н.И. [Сафронов, 1971]. Для идеальных процессов изменение внутренней энергии и энтальпии равно нулю, и свободная энергия ΔF совпадает с энергией Гиббса ΔG . Тогда:

$$\Delta F_{II} = \Delta G = K \ln K. \quad (8)$$

Для магнитной восприимчивости магнетита получено выражение [Портнов, Юров, 2004]:

$$\alpha = \beta \frac{kT}{\Delta G_T^0} C_{Fe}^{Mf}, \quad (9)$$

где $\beta = (2,4 \pm 0,7) \cdot 10^{-2}$ ед. СИ. Чтобы привести к одним единицам измерения, нужно правую часть формулы (9) умножить на число Авогадро N_A , тогда из (8) и (9) имеем с учетом числовых значений $\beta k T N_A \approx 75$ ед. СИ,

$$75 \frac{C_{Fe}^{Mf}}{\alpha} = K \ln K, \quad (10)$$

где $K = C_{Fe}^H / C_{Fe}^K$, а C_{Fe}^H , C_{Fe}^K – начальное и конечное содержание элемента в единице объема, моль. С учетом того, что процесс рудообразования идет с разрежением «атмосферы» элементов железа, из формулы (10) имеем:

$$\ln K = \frac{75(C_{Fe}^K)^2}{C_{Fe}^H \alpha}. \quad (11)$$

Если учесть, что среднее содержание железа в земной коре $C_{Fe}^H = 4,65\%$, то формула (11) принимает вид:

$$\ln K = 16(C_{Fe}^K)^2 / \alpha. \quad (12)$$

Тогда, нетрудно показать с учетом (8), (9), (10) и (12), что для дифференцированных запасов металла имеет место следующая формула:

$$P_K = \frac{1}{\ln(q_1 \alpha_{cp})} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где q_1 – коэффициент, равный 11406, полученный с учетом значений β , C_{Fe}^{Mf} , N_A , k , T ; α_{cp} – среднее значение магнитной восприимчивости магнетитовых руд.

Для Соколовского месторождения, например, среднее значение $\alpha_{cp} = 7,5$ ед.СИ (Fe_2O_3), и соотношение (13) дает для содержания железа в единице объема 8,81% и для магнетита – 23,6%. Н.И. Сафронов для этого же месторождения получил соответственно значения 11,359 и 26,06%. Это незначительно отличается от наших результатов.

Для того чтобы оценить запасы месторождения с использованием соотношения (13), необходимо знать геометрию рудных

тел, их среднюю магнитную восприимчивость, объемное содержание магнетита в руде. Для большинства магнетитовых месторождений Казахстана эти параметры определены [Беркалиев, 1974]. В табл. 1, приведены рассчитанные с учетом этих данных и соотношения (13) ресурсы магнетитовых руд некоторых месторождений Казахстана.

Таблица 1
Ресурсы магнетитовых руд месторождений Казахстана, млн т

Месторождение	Ресурсы руд, млн т	
	прогнозные	разведанные [Беркалиев, 1974]
Соколовское	5330	3343
Сарбайское	2108	890,3
Качарское	6005	3998
Второе (основное рудное тело)	71,87	32,733
Третье рудное тело	17,31	13,51
Куржункульское	639,3	более 80

Из табл. 1 видно, что прогнозные ресурсы Соколовского и Сарбайского месторождений в сумме составляют 7438 млн т,

а разведанные – 4233 млн т. Н.И. Сафонов считает, что объем неразведанных запасов этих месторождений составляет 3–4 млрд т, что вполне согласуется с нашими результатами. Наряду с ранее известными методами преимуществом изложенного выше метода расчета прогнозных ресурсов магнетитовых руд является его экспрессность при удовлетворительной точности результатов. Метод позволяет рассчитывать запасы руд в пределах площади рудного горизонта, блока, охватываемой измерениями магнитной восприимчивости руд в естественном залегании, а также делать их качественную оценку по горизонтам, определяя среднее значение магнитной восприимчивости.

Метод аналогий и поля аналогии

В физике существует значительное количество примеров успешного использования метода аналогий, и это является предпосылкой того, чтобы придать аналогии статус одного из возможных методов научного познания, что было блестяще доказано Дж. Максвеллом [Максвелл, 1954]. В табл. 2 показана аналогия, существующая между величинами в различных скалярных полях.

Таблица 2
Аналогия между величинами в потенциальных полях [Бинс, Лауренсон, 1970]

Параметр	Электростатическое поле	Электрического тока поле	Магнитостатическое поле	Тепловое поле
Потенциал	Потенциал U	Потенциал U	Потенциал Ω	Температура T
Градиент	Напряженность электрического поля E	Напряженность электрического поля E	Напряженность магнитного поля H	Градиент температуры $gradT$
Постоянная, характеризующая свойства среды	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Электрическая проводимость σ	Магнитная проницаемость μ	Температуропроводность a
Плотность потока	Электрическое смещение D	Плотность тока j	Магнитная индукция B	Плотность теплового потока q
Интенсивность источника	Плотность заряда ρ_e	Плотность тока j	Плотность магнитной массы ρ_m	Плотность источника тепла Q
Проводимость поля	Емкость C	Электрическая проводимость G	Магнитная проводимость Λ	Тепловая проводимость λ

Результаты измерений удельного электрического сопротивления (ρ) в различных методах электроразведки могут быть использованы для подсчета прогнозных ресурсов полезных ископаемых.

Пользуясь аналогией (табл. 2) для методов электроразведки, получим:

$$P_k = \frac{1}{\ln(q_2 \sigma)} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где σ – электропроводность минерала, (Омм)⁻¹.

Используя ранее полученное, экспериментально подтвержденное, значение q_1 для средних значений магнитной воспри-

имчивости и приравнявая (15) и (16), для одного и того же месторождения нетрудно получить:

$$q_2 = q_1 \alpha_{cp} \rho_{cp},$$

где ρ_{cp} – среднее значение удельного электрического сопротивления магнетитовых руд.

Это позволяет вычислить коэффициент q_2 , который равен – 155121. Значение q_2 , так же как и q_1 , можно определять в лабораторных условиях, определяя содержание полезного элемента P_k в руде с помощью физических или химических методов анализа и измеряя соответствующую величину

в формулах (15) и (16). В табл. 3 приведена иллюстрация предложенного метода.

с помощью формулы (16), представлены в табл. 4.

Таблица 3

Прогнозные дифференцированные ресурсы угля основных свит Карагандинского угольного бассейна

Свита	Удельное сопротивление углей, ρ (Ом·м) [Дрижд и др.]	Дифференцированные запасы P_k (%)
Долинская	134,8	14,2
Тентекская	155,0	14,5
Карагандинская	145,1	14,3
Ашлярикская	86,7	13,4

Предложенный нами термодинамический анализ результатов измерений магнитной восприимчивости был использован и для гамма-гамма-метода. Отличие состоит в том, что энергия гамма-квантов E_γ значительно превосходит энергию магнитных диполей, поэтому членом $\exp(E_m/kT)$ в выражении для функции отклика пренебрегать уже нельзя. Беря в качестве функции отклика Φ относительную интенсивность рассеянного гамма-излучения с энергией E_γ , получаем:

$$1 - \frac{I}{I_0} = -B \frac{C_{Fe}}{G^0 E_\gamma}, \quad (15)$$

где I – интенсивность регистрируемых гамма-квантов после рассеяния; I_0 – интенсивность гамма-квантов от источника, $B = (kT)^2/C$, $C = 2\Delta S/k$ – постоянная для данного элемента и источника гамма-излучения; ΔS – изменение энтропии при квантовом переходе из возбужденного состояния в основное,

$$\Delta S = \bar{N} E_\gamma^2 / 2 kT^2,$$

где \bar{N} – среднее число атомов элемента в минерале; G^0 – энергия Гиббса железосодержащего минерала с содержанием общего железа C_{Fe} .

Из (15) следует линейная зависимость интенсивности рассеянного излучения от содержания железа C_{Fe} , что соответствует экспериментальным данным.

Для расчета прогнозных ресурсов с использованием результатов измерений в гамма-гамма методе достаточно выполнить анализ, аналогичный приведенному выше, и воспользоваться формулой (15). В результате при $q_4 = 809826$, получаем:

$$P_k = \frac{1}{\ln(q_4 I/I_0)} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Для ряда железорудных месторождений прогнозные ресурсы, вычисленные

Таблица 4
Ресурсы железных руд и угольных месторождений Казахстана, млн т

Месторождение	Ресурсы руд, млн т	
	прогнозные	разведанные [Беркалиев, 1974]
Атансор	51,6	55,9
Тлеген	19,3	12,0
Кузган	23,4	14,6
Сарытобе	35,9	20,0

Используем аналогию между электрическими и акустическими системами, представленную в табл. 5.

Таблица 5

Аналогия между электрическими и акустическими переменными и параметрами [Ольсон, 1947]

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 движения частиц v , которая и является измеряемой величиной в сейсморазведке. Для прогнозных ресурсов минерального сырья, используя данные сейсморазведки, получено выражение

$$P_k = \frac{1}{\ln(q_5 \vartheta)} \cdot 100\%, \quad (17)$$

где $q_5 = 26,03$. В качестве примера в табл. 3 представлены результаты расчета прогнозных дифференцированных ресурсов по формуле (17) для уже рассчитанных ресурсов угольных свит Карагандинского бассейна по данным электроразведки.

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

Заключение

Определение прогнозных ресурсов полезных ископаемых имеет важное значение с экономической точки зрения. Использование геофизических методов разведки, особенно в естественном залегании (метод

искусственного подмагничивания, метод вызванной электрической поляризации и т.д.), позволяют значительно экономить средства на бурение разведочных скважин. Следует отметить также, что значение соответствующей физической величины (магнитной восприимчивости, удельного сопротивления и т.д.) определяется величиной энергии Гиббса.

Последняя, как известно, равна $G^0 = H - TS + PV$, где энтальпия H определяет метаморфизм руд и минералов, энтропия S определяет их структурную упорядоченность, температура и давление – термодинамические условия образования минералов.

Список литературы

1. Беркалиев Б. Железородная промышленность Казахстана. – Алма-Ата, 1974. – 140 с.
2. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. – М.: Энергия, 1970. – 376 с.
3. Булкин Г. А. Количественная оценка прогнозных запасов руд. – М.: Недра, 1984. – 129 с.

4. Дрижд Н.А., Баймухаметов С.К., Тоблер В.А. Карагандинский угольный бассейн: справочник. – М.: Недра, 1990. – 299 с.

4. Киттель Ч. Статистическая термодинамика. – М.: Наука, 1977. – 336 с.

5. Максвелл Дж.К. Статьи и речи. – М.: Наука, 1954. – 422 с.

6. Ольсон Г. Динамические аналогии. – М.: ИЛ, 1947. – 276 с.

7. Портнов В.С., Юров В.М. Связь магнитной восприимчивости магнетитовых руд с термодинамическими параметрами и содержанием железа // Известия вузов. Горный журнал. – 2004. – № 6. – С. 122–127.

8. Сафронов Н.И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. – Л.: Недра, 1971. – 212 с.

9. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. – Л.: Недра, 1978. – 215 с.

Рецензенты:

Данияров Н.А., д.т.н., зам. директора по научной работе ДГП «КазНИИ БГП», г. Караганда;

Кенжин Б.М., д.т.н., профессор, директор ТОО «Карагандинский машиностроительный Консорциум», г. Караганда.

Работа поступила в редакцию 29.12.2011.