

УДК 550.8:553.3/9

В.С. Портнов¹, д-р техн. наук, проф.,
В.М. Юров², канд. физ.-мат. наук, доц.,
А.Д. Маусымбаева¹, канд. техн. наук

1 – Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан
2 – Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, г. Караганда, Республика Казахстан

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

V.S. Portnov¹, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
V.M. Yurov², Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,
A.D. Maussymbayeva¹, Cand. Sci. (Tech.)

1 – Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan
2 – E.A. Buketov Karaganda State University, Karaganda, Kazakhstan

APPLIED PROBLEMS OF THERMODYNAMIC APPROACH TO THE ANALYSIS OF GEOPHYSICAL INFORMATION

Для повышения эффективности геофизических методов разведки полезных ископаемых разработан термодинамический подход к анализу геофизической информации, получаемой методами скважинной, наземной, аэро- или космической разведок.

Цель. Установить связь между измеряемой величиной в геофизических методах разведки и физическими свойствами руд и минералов, их прогнозными ресурсами, энергией диспергирования руд и минералов, возможностью их обогащения.

Методика. Элементарные возбуждения (ЭВ) в руде и минералах (магнитные или электрические диполи, дефекты и т.д.) рассматриваются как система невзаимодействующих частиц, погруженная в термостат. Квантовые переходы, обусловленные взаимодействием ЭВ с термостатом, будут диссипативными (с вероятностью P) в отличие от взаимодействия с внешним полем (с вероятностью F). Вычисляется функция отклика системы $\Phi = F/F + P$ на внешнее поле (магнитное, электрическое, гравитационное и т.д.). В качестве функции отклика системы можно взять магнитную восприимчивость (магниторазведка), удельное сопротивление (электроразведка), аномалию ускорения свободного падения (гравиразведка) и т.д.

Результаты. Получены формулы, устанавливающие связь между измеряемой величиной в геофизических методах разведки и концентрацией полезного компонента того или иного месторождения полезного ископаемого. Получены формулы для оценки прогнозных ресурсов полезных ископаемых для конкретного месторождения. Получены формулы для количественной оценки энергии диспергирования руд и минералов.

Научная новизна. Впервые методы неравновесной квантовой статистической термодинамики использованы для расчета измеряемых величин в геофизических методах разведки полезных ископаемых.

Практическая значимость. Использование предлагаемых методов и формул позволяет значительно сократить число геологоразведочных работ (бурение скважин и т.п.), что резко снижает стоимость работ, связанных с оценкой экономической перспективы разработки того или иного месторождения полезных ископаемых.

Ключевые слова: *неравновесная статистическая термодинамика, элементарные возбуждения, функция отклика, геофизические методы разведки полезных ископаемых, прогнозные ресурсы*

Постановка проблемы. Начало 21-го века характеризуется повышенным вниманием исследователей к интерпретации геофизических данных. Это обусловлено, прежде всего, возрастанием стоимости геологоразведочных работ. Раньше поиски большинства полезных ископаемых чаще всего 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. Развитие новых методов разведки полезных ископаемых, а также новых методов интерпретации геофизических данных становится крайне необходимым.

Анализ последних исследований и публикаций. В последние годы появилось большое количество моно-

графий и статей, посвященных различным аспектам теории обработки геофизической информации, из которых мы приводим список основных работ [1–8], не претендуя на его полноту. Использование для интерпретации геофизической информации методов неравновесной квантовой статистической термодинамики обобщено нами в работе [9].

Целью настоящей работы является описание практического использования основных соотношений, полученных в рамках термодинамического подхода к анализу геофизической информации.

Изложение основного материала. Термодинамический анализ 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 обладающем термодинамическими параметрами, которые непосредственно связаны с его структурными, химическими и физическими свойствами.

Таким образом, с помощью неравновесной статистической термодинамики можно найти связь (функцию отклика Φ) между микроскопическими (квантовыми) процессами взаимодействия первичных полей (параметры которых можно контролировать и изменять в широких пределах) с макроскопическими характеристиками геологического объекта.

Магниторазведка. Если в качестве функции отклика взять магнитную восприимчивость χ [1, 2], то для магнетитовых руд имеет место соотношение

$$\chi = C \cdot \frac{C_{Fe}^M}{G^0}, \quad (1)$$

где C_{Fe}^M – концентрация железа; G^0 – энергия Гиббса термостата (магнетитовой руды); C – постоянная.

В рамках развитых представлений для дифференцированных запасов металла получена следующая формула [5, 6]

$$P_x = \frac{1}{\ln(1406 \cdot \chi)} \cdot 100\% \cdot \quad (2)$$

Для того, чтобы оценить запасы месторождения с использованием соотношения (5), необходимо знать геометрию рудных тел, их среднюю магнитную восприимчивость, объемное содержание магнетита в руде. Для большинства железорудных месторождений Казахстана и Украины эти параметры определены. В табл. 1, 2 приведены, рассчитанные с учетом этих данных и соотношения (2), запасы железных руд некоторых месторождений Казахстана и Украины. Из табл.1 видно, что прогнозные запасы магнетитовых руд, рассчитанные по (2), больше разведанных. Однако для малых, полностью раз-

работанных месторождений, прогнозные и разведанные запасы совпадают с приемлемой точностью.

Таблица 1

Прогнозные и разведанные запасы руд магнетитового железа месторождений Казахстана

Месторождение	Прогнозные запасы руды, млн тонн	Разведанные запасы руды, млн тонн
Соколовское	5330	3343
Сарбайское	2108	890,3
Качарское	6005	3998
Кентобе		
Второе (основное рудное тело)	71,87	32,733
Третье рудное тело	17,31	13,51
Куржункульское	639,3	более 80

Таблица 2

Прогнозные и разведанные запасы железорудных месторождений Украины

Месторождение	Прогнозные запасы руды, млн тонн	Разведанные запасы руды, млн тонн
Криворожский железорудный бассейн	3600	2180
Кременчугский железорудный район	5200	4500
Белозерский железорудный район	860	700

Прогнозные запасы Соколовского и Сарбайского месторождений в сумме составляют 7438 млн т., а разведанные – 4233 млн т. Сафронов Н.И. [10] считает, что объем неразведанных запасов этих месторождений составляет 3–4 млрд тонн, что вполне согласуется с нашими результатами.

Для железорудных месторождений Украины существует неплохое соответствие запасов, рассчитанных по (2) и разведанных (табл. 2). Украинские специалисты оценивают прогнозные запасы Криворожского бассейна в 19 млрд т., что в сумме с разведанными составляет около 40 млрд т. против 36 млрд т., полученных по (2). Приведенные примеры говорят в пользу предложенной модели.

Электроразведка. Возникновение тока плотностью j в среде является откликом системы невзаимодействующих электронов на внешнее поле E и имеет вид ($\Phi=j$)

$$j = \frac{kT}{C_1} \frac{eE}{G^0} \cdot \bar{N}. \quad (3)$$

Когда $\bar{N} = \text{const}$, мы из (3) имеем закон Ома в дифференциальной форме

$$j = \sigma E, \quad (4)$$

где

$$\sigma = \frac{kT}{C_1} \frac{e\bar{N}}{G^0}. \quad (5)$$

Проводимость σ связана с удельным сопротивлением ρ соотношением

$$\rho = 1/\sigma = C \cdot G^0 / e\bar{N}; \quad C = \frac{C_1}{kT}. \quad (6)$$

Из (5) следует зависимость электропроводности минерала σ от температуры, давления, химического состава и т.д. через энергию Гиббса.

Для прогнозных ресурсов получаем формулу

$$P_d = \frac{1}{\ln(1551215 \cdot \rho)} \cdot 100\%. \quad (7)$$

В табл. 3 представлены расчеты прогнозных дифференцированных запасов угля основных свит Карагандинского угольного бассейна.

Таблица 3

Прогнозные дифференцированные запасы угля основных свит Карагандинского угольного бассейна

Свита	Удельное сопротивление, ρ (Ом·м)	Дифференцированные запасы, %
Долинская	134,8	14,2
Тентекская	155,0	14,5
Карагандинская	145,1	14,3
Ашлярикская	86,7	13,4

Площадь Карагандинского угольного бассейна примерно равна 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, то есть почти в два раза больше. Частично такое расхождение связано с различием в расчетах промышленной углеплотности. Максимальная промышленная углеплотность на участках распространения всех четырех продуктивных свит составляет 103 млн тонн на 1 км², а по кондициям 1960 г. (которые действуют до сих пор) – 71 млн тонн на 1 км², т.е. различие примерно в полтора раза.

Площадь Донецкого угольного бассейна около 60 тыс. км². Суммарные запасы до глубины 1800 м – 140,8 млрд тонн. В угленосной толще каменноугольного возраста до 300 пластов; средняя мощность рабочих пластов 0,6–1,2 м. Угли каменные марок Д-Т (78%), антрациты (22%). Теплота сгорания 21,2–26,1 МДж/кг. Основные центры добычи – Донецк, Красноармейск, Макеевка, Лисичанск, Горловка, Свердловск, Ровеньки, Антрацит, Торез, Красный Луч и другие.

Оценка по (7) дает значение прогнозных запасов для Донецкого угольного бассейна – 460 млрд тонн. Это завышенное значение показывает, что для угольных бассейнов в целом проводить расчеты по среднему значению удельного сопротивления нецелесообразно. Это связано с изменением последнего в очень широких пределах. Так, например, для антрацитов удельное сопротивление меняется от 10⁻³ до 10 Ом·м. Поэтому предлагаемый метод нужно использовать для отдельных свит, содержащих угли одной марки и имеющих примерно одинаковое сопротивление.

Гравиразведка. Чтобы проиллюстрировать термодинамический подход к задачам гравиразведки мы использовали сферическую модель Земли. В результате для аномалии ускорения свободного падения мы получили

$$\Delta g = C \cdot \frac{\Delta G^0}{C_i} \quad (8)$$

Здесь Δg – аномалия ускорения свободного падения; G^0 – энергия Гиббса; C_M – концентрация минерала в месторождении; $C = const$.

Для дифференцированных запасов P_d получаем

$$P_d = \frac{1}{\ln(1002473 \cdot \Delta g)} \cdot 100\%. \quad (9)$$

В качестве примера в табл. 4 представлены результаты расчета прогнозных ресурсов некоторых угольных месторождений Казахстана, где проводилась гравиразведка.

Таблица 4

Прогнозные и разведанные ресурсы некоторых угольных месторождений Казахстана

Месторождение	Прогнозные ресурсы, млн тонн	Разведанные ресурсы, млн тонн
Тениз	2243	355
Борлы	1760	478
Куучеку	3140	636
Майкюбинский	5500	3647

Сейсморазведка. Сейсмическая разведка включает совокупность методов для изучения глубинного строения земной коры. Используем аналогию между электрическими и акустическими системами, представленную в табл. 5.

Таблица 5

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	$C_A = 1/\tau$

Для нас представляет интерес скорость частиц v , которая и является основой сейсморазведки. Согласно табл. 5, ей соответствует ток I , который, согласно (3–5) пропорционален электропроводности σ и обратно пропорционален удельному сопротивлению.

Для прогнозных запасов P_R минерального сырья, используя данные сейсморазведки (скорость v), мы получаем следующее выражение

$$P_e = \frac{1}{\ln(26,03 \cdot g)} \cdot 100\% \quad (10)$$

В качестве примера в табл. 6 представлены результаты расчета прогнозных дифференцированных ресурсов по (10) для уже рассчитанных угольных свит Карагандинского угольного бассейна по данным электроразведки.

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

Ядерно-физические методы. В случае гамма-гамма-методов число факторов, влияющих на результаты геофизического опробования, значительно больше, чем в случае магнитных измерений. Помимо минерального состава, текстуры руд и т.д. существенную роль играет геометрия измерений, которая предъявляет довольно жесткие требования к конструкции измерительных уст-

ройств. К этому нужно добавить влияние влажности и зависимость результатов измерений от энергии первичных гамма-квантов. Предложенный нами выше термодинамический анализ магнитных методов измерения может быть 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 интенсивность рассеянного гамма-излучения с энергией E_γ , мы получаем

$$1 - I / I_0 = -B \frac{C_{Fe}}{G^0 E_\gamma}, \quad (11)$$

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, $\Delta S = \bar{N}E_\gamma^2/2kT^2$, где \bar{N} – среднее число атомов элемента в минерале; G^0 – энергия Гиббса железосодержащего минерала. Из (11) следует линейная зависимость интенсивности рассеянного излучения от содержания железа C_{Fe} , что соответствует экспериментальным данным. Из (11) следует обратно-пропорциональная зависимость чувствительности гамма-метода к содержанию железа от энергии первичных гамма-квантов, что также подтверждается экспериментально. В случае магнетита (Fe_3O_4) $G^0 \approx 1$ кДж/моль мы получаем уравнение связи

$$C_{Fe} = 71 \cdot I / I_0. \quad (12)$$

Таблица 6

Прогнозные дифференцированные запасы угля 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

Из экспериментальных данных имеем $C_{Fe} = 76 \cdot I/I_0$, что близко к (12) в пределах погрешности метода. Уравнения связи типа (11, 12) можно получить и для других железосодержащих минералов, используя экспериментальные значения энергии Гиббса G^0 этих минералов. Используя (11), мы получили

$$C_{Fe} = const \cdot G^0 \cdot \left(\frac{E_\gamma}{Z_{эф}} \right)^4. \quad (13)$$

Здесь E_γ – энергия гамма-квантов; $Z_{эф}$ – атомный номер. Соотношение (13) показывает связь между определяемой концентрацией железа с характеристиками первичного гамма-излучения, эффективными атомным номером и термодинамическими свойствами среды. Для прогнозных ресурсов P_K получаем

$$P_e = \frac{1}{\ln(809826 \cdot I / I_0)} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Для ряда железорудных месторождений Казахстана прогнозные ресурсы, вычисленные с помощью (14), представлены в табл. 7.

Таблица 7

Прогнозные и разведанные запасы железных руд некоторых месторождений Казахстана

Месторождение	Прогнозные запасы (млн тонн)	Разведанные запасы (млн тонн)
Атансор	51,6	55,9
Тлеген	19,3	12,0
Кузган	23,4	14,6
Сарытобе	35,9	20,0

Теплофизические свойства минералов. На основе развитых представлений и метода аналогий для коэффициента теплопроводности минералов нами получено уравнение

$$\lambda = \frac{625\rho}{3C_2 G^0} \cdot \dot{O}. \quad (15)$$

Здесь λ – коэффициент теплопроводности. В (15) входят только два параметра минерала – плотность ρ и энергия Гиббса G^0 , которые экспериментально определены для большого количества минералов и представлены в справочниках. Для коэффициента мы получили значение $C_2 = 2,8 \cdot 10^{-2}$ (м²/кг·с). Для прогнозных ресурсов P_K получено

$$P_e = \frac{1}{\ln(36585,3 \cdot \lambda)} \cdot 100\%. \quad (16)$$

В качестве примера в табл. 8 приведены рассчитанные запасы некоторых месторождений неметаллических полезных ископаемых Казахстана.

Из табл. 8 видно хорошее совпадение разведанных и рассчитанных запасов.

Таблица 8

Прогнозные запасы неметаллических полезных ископаемых

Месторождение	Минерал	λ , (Вт/м·К)	Прогнозные запасы (млн тонн)	Разведанные запасы (млн тонн)
Тектурмас	Кварцит	7,98	39,90	40,90
Сарытоганбай	Графит	389,00 87,60	132,00	100,00
Семизбугы	Корунд	34,60	0,22	0,18

Поверхностное натяжение и энергия диспергирования упорных руд и минералов. В настоящее время во всех горнодобывающих странах на дробление и измельчение руды тратится от 45 до 55% всей потребляемой электроэнергии в этой отрасли. Поэтому, знание энергии диспергирования (разрушения) руд и минералов крайне важно для выбора метода рудоподготовки.

Произведение $\sigma \cdot S$ представляет собой работу диспергирования, где σ – поверхностное натяжение минерала, S – его удельная поверхность.

Поверхностное натяжение – основная характеристика процессов, связанных с участием поверхностей или границ раздела фаз. Поверхностное натяжение опреде-

ляет свободную энергию (работу), которую необходимо затратить, чтобы образовать единицу площади поверхности или раздела фаз. Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение металлов при температурах, близких к точке плавления.

Обзор методов определения поверхностного натяжения твердых тел дан в работе [10]. В работе [9] дан обзор предложенных нами новых методов определения поверхностного натяжения магнитных материалов, диэлектриков, металлов и т.д. В основе этих методов лежит размерная зависимость свойств твердого тела и формула, полученная в рамках термодинамического подхода, имеющая вид

$$A(r) = A_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{r}\right); \quad (17)$$

$$d = 2\sigma\vartheta/RT. \quad (18)$$

Здесь $A(r)$ – размерная зависимость физического свойства A твердого тела; A_0 – физическое свойство массивного образца; σ – поверхностное натяжение; v – удельный объем; R – газовая постоянная; T – температура.

Экспериментальное определение σ сводится к измерению зависимости физического свойства образца от его размера. В качестве примера, на рисунке показана зависимость магнитной восприимчивости от размера зерна магнетита для Соколовского и Сарбайского месторождений.

В координатах $\alpha \sim 1/r$ экспериментальная кривая спрямляется в соответствии с (17), давая значение $d = 0,36$ мкм. Для магнетита $\vartheta = 44,5$ см³/моль и из соотношения (18) для поверхностного натяжения получено $\sigma = 10,07 \cdot 10^3$ эрг/см². Расчеты по формулам теории магнетизма, с использованием экспериментальных значений намагниченности насыщения, дали значение $\sigma = 10,1 \cdot 10^3$ эрг/см², что практически совпадает с приведенным выше.

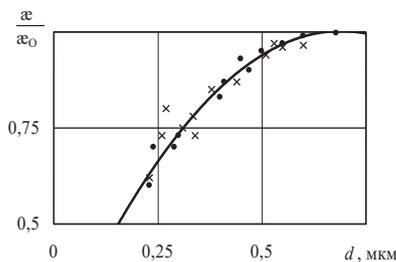


Рис. Зависимость магнитной восприимчивости от диаметра зерна магнетита

В качестве примера, в табл. 9 приведены значения энергии диспергирования некоторых сульфидов.

Обогащаемость и флотационные свойства минералов. Чем больше поверхностное натяжение минералов, тем труднее их обогащать. В табл.10 приведены значения поверхностного натяжения ряда минералов.

Отличительная черта вещественного состава труднообогатимых руд многих новых и эксплуатируемых мес-

торождений – тонкозернистая структура и сложная текстура, а иногда и субмикроскопические формы взаимосвязи слагающих их минералов. Труднообогатимыми являются и другие виды минерального сырья: железистые кварциты, медно-никелевые руды, оловянные продукты и др.

Таблица 9

Энергия диспергирования сульфидов металлов подгруппы меди

Соединение	Поверхностное натяжение	Удельная поверхность частиц S, см ² /г		
		1x10 ⁴	5x10 ⁴	1x10 ⁵
CuS	0,571	571	2855	5710
Ag ₂ S	0,651	651	3255	6510
Au ₂ S	0,719	719	3595	7190

Таблица 10

Поверхностное натяжение некоторых минералов

Название минерала	Химическая формула	Поверхностное натяжение σ , Дж/м ²
Целестин	SrSO ₄	0,178
Кварц	SiO ₂	0,406
Барит	BaSO ₄	0,172
Антимонит	Sb ₂ S ₃	0,416
Аурипигмент	As ₂ S ₃	0,468
Кианит	Al ₂ (SiO ₄)O	0,323
Церруссит	PbCO ₃	0,630
Галит	NaCl	0,160
Якобсит	MnFe ₂ O ₄	0,524
Альбит	Na(AlSi ₃ O ₈)	0,354
Форстерит	Mg ₂ SiO ₄	0,359
Магнезит	MgCO ₃	0,675
Сподумен	LiAl(Si ₂ O ₆)	0,344
Пирит	FeS ₂	0,603
Флюорит	CaF ₂	0,273
Халькопирит	CuFeS ₂	0,690
Сфалерит	α -ZnS	0,379
Смитсонит	ZnCO ₃	0,643
Лейцит	KAlSi ₂ O ₆	0,336
Циркон	ZrSiO ₄	0,426

Используя геофизические методы разведки, можно определять поверхностное натяжение руд и минералов в их естественном залегании по формулам:

- $\sigma = C_1 / \chi$ – магниторазведка;
- $\sigma = C_2 \cdot \rho$ – электроразведка;
- $\sigma = C_3 / (1 - I/I_0)$ – гамма-гамма метод;
- $\sigma = C_4 \cdot \Delta g$ – гравиразведка;
- $\sigma = C_5 \cdot v$ – сейсморазведка.

Полученные выше связи между поверхностным натяжением минералов и измеряемой величиной, в том или ином методе геофизического исследования, содержат постоянную, которую нужно определять эмпирическим путем, используя корреляционный анализ. Достоверность полученных результатов будет возрастать при близости полученных результатов и результатов, полученных различными геофизическими методами.

Выводы. Измеряя физические свойства минералов в их естественном залегании (метод искусственного под-

магничивания, электрического зондирования и т.д.), мы можем определять дифференцированные запасы полезных ископаемых, их энергию диспергирования и обогащаемость по предложенным выше методам, не прибегая к дорогостоящим методам бурения разведочных скважин. Точность определения запасов минерального сырья, физических свойств руд и минералов будет возрастать при использовании различных (не менее двух) методов для одного и того же месторождения.

Список литературы / References

1. Овсов М.К. Применение методов распознавания и аналогии с целью прогноза и поисков полезных ископаемых / М.К. Овсов, А.И. Иванов // Российский геофизический журнал. – 1999. – №15–16. – С. 36–41.

Ovsov, M.K. and Ivanov, A.I., 1999. Application of the recognition and the analogy with the purpose of forecasting and searches of minerals. *Rossiyskiy Geofizicheskiy Zhurnal*, 15–16, pp. 36–41.

2. Страхов В.Н. Геофизика и математика. Методологические основы математической геофизики / В.Н. Страхов // Геофизика. – 2000. – № 1. – С. 3–18.

Strakhov, V.N., 2000. Geophysics and mathematics. Methodological basis of mathematical geophysics. *Geofizika*, 1, pp. 3–18.

3. Кондратьев О.К. Математика в геофизике / О.К. Кондратьев // Геофизика. – 2000. – № 2. – С. 6–15.

Kondratiev, O.K., 2000. Mathematics in geophysics. *Geofizika*, 2, pp. 6–15.

4. Chemin, J.-Y., Desjardins, B., Gallagher, I. and Grenier, E., 2006. *Mathematical geophysics*. Oxford University Press.

5. Gubbins, D., 2004. *Time series analysis and inverse theory for geophysicists*. Cambridge University Press.

6. John, H., 1994. *Doveton Geologic Log Analysis Using Computer Methods*. Kansas: University of Kansas Lawrence.

7. Majda, A.J. and Wang, X., 2006. *Non-linear dynamics and statistical theories for basic geophysical flows*. Cambridge University Press.

8. Roy, K.K., 2008. *Potential theory in applied geophysics*. Springer.

9. Геофизические задачи в исследовании зон с повышенной газоотдачей угольных пластов / Портнов В.С., Юров В.М., Хамитов Е.С., Муллагалиев Ф.А. – Караганда: КарГТУ, 2014. – 179 с.

Portnov, V.S., Yurov, V.M., Khamitov, E.S. and Mullagaliev, F.A., 2014. *Geofizicheskiye zadachi v issledovanii zon s povyshennoy gazootdachey ugolnykh plastov* [Geophysical research problem in areas with enhanced gas coal seams]. Karaganda: KGTU.

10. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности / Ролдугин В.И. – Долгопрудный: Издательский дом „Интеллект“, 2008. – 508 с.

Roldugin, V.I., 2008. *Fizikokhimiya poverkhnosti* [Physics and chemistry of a surface]. Dolgoprudny: Intellekt.

Для підвищення ефективності геофізичних методів розвідки корисних копалини розроблений термодинамічний підхід до аналізу геофізичної інформації, що отри-

мується методами свердловинної, наземної, аеро- або космічної розвідок.

Мета. Встановити зв'язок між вимірюваною величиною в геофізичних методах розвідки та фізичними властивостями руд і мінералів, їх прогнозними ресурсами, енергією диспергування руд і мінералів, можливістю їх збагачення.

Методика. Елементарні збудження (ЕЗ) в руді та мінералах (магнітні або електричні диполі, дефекти й так далі) розглядаються як система невзаємодіючих часток, занурена в термостат. Квантові переходи, обумовлені взаємодією ЕЗ з термостатом, будуть дисипативними (з вірогідністю Р) на відміну від взаємодії із зовнішнім полем (з вірогідністю F). Обчислюється функція відгуку системи $\Phi = F/F + P$ на зовнішнє поле (магнітне, електричне, гравітаційне й так далі). У ролі функції відгуку системи можна взяти магнітну сприйнятливість (магніторозвідка), питомий опір (електророзвідка), аномалію прискорення вільного падіння (гравірознавдя) і так далі.

Результати. Отримані формули, що встановлюють зв'язок між вимірюваною величиною в геофізичних методах розвідки та концентрацією корисного компонента того або іншого родовища корисної копалини. Отримані формули для оцінки прогнозних ресурсів корисних копалин для конкретного родовища. Отримані формули для кількісної оцінки енергії диспергування руд і мінералів.

Наукова новизна. Уперше методи нерівноважної квантової статистичної термодинаміки використані для розрахунку вимірюваних величин у геофізичних методах розвідки корисних копалин.

Практична значимість. Використання пропонованих методів і формул дозволяє значно скоротити число геологорозвідувальних робіт (буріння свердловин і тому подібне), що різко знижує вартість робіт, пов'язаних з оцінкою економічної перспективи розробки того або іншого родовища корисних копалин.

Ключові слова: нерівноважна статистична термодинаміка, елементарні збудження, функція відгуку, геофізичні методи розвідки корисних копалин, прогнозні ресурси

To improve the efficiency of geophysical methods of mineral exploration we have developed the thermodynamic approach to the analysis of geophysical data, obtained by the well, ground, aerial or space surveillance.

Purpose. To establish the connection between the measured quantity in geophysical exploration methods with the physical properties of ores and minerals and their prognostic resources, energy dispersion of refractory ores and minerals, the possibility of enrichment.

Methodology. Elementary excitations (EE) in the ore and minerals (magnetic or electric dipoles, defects, etc.) are regarded as a system of non-interacting particles immersed in a thermostat. Quantum transitions, caused by the interaction EE with the thermostat will be dissipative (with probability of P) in contrast to the interaction with the external field (with a probability of F). The response function (RF) of the system $RF = F / F + P$ to an external field (magnetic, electrical,

gravitational, etc.) was calculated. As the response function of the system can take the magnetic susceptibility (magnetic survey), resistivity (electrical survey), the anomaly of gravitational acceleration (gravimetric), etc.

Findings. The formulas, which establish the connection between the measured quantities in geophysical exploration methods to the concentration of the useful component of a field of natural resources, were obtained. The formulas for predicted mineral deposits resources for a particular field and the formulas for quantifying the energy dispersion of refractory ores and minerals were obtained.

Originality. For the first time the methods of non-equilibrium quantum statistical thermodynamics were used

УДК 553.81:553.068.5 (477.54+477.46)

**M.V. Ruzina, Dr. Sci. (Geol.), Professor,
O.A. Tereshkova, Cand. Sci. (Geol.),
N.V. Bilan, Cand. Sci. (Geol.), Associate Professor,
N.G. Vunda**

for calculation of the measured values in geophysical methods of mineral exploration.

Practical value. The use of the suggested methods and formulas can significantly reduce the number of geological exploration (drilling, etc.), which dramatically reduces the cost of works associated with the assessment of the economic prospects for the development of a mineral deposit.

Keywords: *nonequilibrium statistical thermodynamics, elementary excitations, response function, geophysical methods of mineral exploration, estimated resources*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
Т.К. Ісабек. Дата надходження рукопису 06.02.15.*

State Higher Educational Institution "National Mining University", Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: ruzinamarina@rambler.ru

PROSPECTS FOR DIAMOND CONTENT IN RAYGORODSKA STRATA OF THE UKRAINIAN SHIELD

**М.В. Рузіна, д-р геол. наук, проф.,
О.А. Терешкова, канд. геол. наук,
Н.В. Білан, канд. геол. наук, доц.,
Н.Г. Вунда**

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна, e-mail: ruzinamarina@rambler.ru

ПЕРСПЕКТИВИ АЛМАЗОНОСНОСТІ РАЙГОРОДСЬКОЇ ТОВЩІ УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА

Purpose. To evaluate the prospects for diamond content in Raygorodska strata of the Ukrainian shield.

Methodology. A complex of field and laboratory tests was used to achieve the purpose of the research. Petrographic and mineragraphic studies, paleogeographic reconstruction and lithofacies analysis were carried out.

Findings. It has been found that the diamondiferous rock of Raygorodska strata refers to the marginal-marine type of sedimentary and pyroclastic group of rock. Diamondiferous bedrock processed by breaking waves and its alluvial migration from the continental surface can be considered as a possible source of incoming diamondiferous debris. Formation of marginal-marine diamond-bearing facie of Raygorodska strata is due to the peculiarities of paleogeography of the periphery of the Paleocene Sumy marine basin. Fluidized-explosive unit spatially related to Raygorodska strata has been discovered. This unit is similar in composition to diamondiferous mica-lamprophyre of Minette type from Parker Lake area, Canada, as well as to diamondiferous rovnenskites of the Ukrainian shield. The occurrence of diamonds set earlier in raygorodska strata is similar to pyroclastic kimberlites from the Fort à la Corne area (Saskatchewan, Canada) and to mineragenic type of pyroclastic kimberlite accumulated in shallow marine basins.

Originality. Fluidized-explosive unit and the peculiarities of lithofacies and stratigraphic position of raygorodska strata have been revealed. The potential diamond content of fluidized-explosive unit was substantiated. Mineragenic type of previously established occurrences of diamonds has been proved; the probable directions of transport and accumulation areas of diamond detritus of Raygorodska strata have been determined.

Practical value. New forecasting and prospecting criteria for diamond content in raygorodska strata have been formulated. These criteria allow extending the boundaries of the Kirovohrad area in the Central diamond prospective region and delineate potentially diamond placers.

Keywords: *volcanic-sedimentary rock, fluidized-explosive unit, pyroclastic kimberlites, mica-lamprophyres, diamond placers*

Introduction. Up to date, forecasting and prospecting works on assessing the prospects for diamond in Ukraine are mainly based on classical concepts about the formation of diamond associated with kimberlite and lamproite magmatism. However, the minerageny of diamond has accumulated

a large amount of data, which require revising the theory of age, genetic types and regularities of diamond forming. For example, diamond occurrences have been found within the Central diamond prospective region in the Kirovohrad block of the Ukrainian shield (UkrSh), but their primary deposits have not been discovered yet, nor has their mineragenic type been substantiated. As a result of prospecting works (geological survey expedition No. 37 of State Enterprise (SE) "Ki-