

Простые и удобные в эксплуатации, с несложным однокнопочным управлением счетчики Нижегородского завода зарекомендовали себя с лучшей стороны. Технические характеристики данных счетчиков полностью соответствуют требованиям главы 5 «Электросетевых правил РК» (Электросетевые правила РК, раздел 5 «Коммерческий учет» (утверждены 24 декабря 2001 г.)).

УДК 550.83:553.43/574

В.С.Портнов, М.П.Пузеева, А.К.Турсунбаева

Карагандинский государственный технический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ, СЕЙСМО- И ГРАВИРАЗВЕДКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ ЗАПАСОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Қолданбалы геологиядағы маңызды мәселе — бұл пайдалы қазбалардың кен шығатын жердегі сандық базасы. Қиын ашылатын пайдалы қазбалардың кен шығатын жердің жалпы қоры оңай ашылатын пайдалы қазбалардың кен шығатын жерінен әлдеқайқат көбірек болғанын шамамен жасалынған есептеулер көрсетеді. Осыған байланысты дүниежүзілік және регионалды деңгейде бұрын және бүгінгі күні көптеген жұмыстар атқарылып жатыр. Жұмыста барлаудың геофизикалық әдістерінің негізінде пайдалы қазбалардың қорларды анықтау әдістері ұсынылады. Алған мәліметтер зерттелген қорлармен теңеседі.

A quantitative estimation look-ahead stocks of minerals in deposits — the major problem of applied geology. Rough calculations show, that the general fund of difficultly opened deposits on the majority of minerals many times over exceeds resources of easily opened deposits. It is necessary to add, that stocks of ores opened and even maintained deposits can essentially exceed reconnoitered. In this connection, both earlier and now there are the works connected with an estimation of minerals stocks both at a regional level, and in world scales. In the present work ways of minerals stocks definition on the basis of geophysical methods of investigation are offered. The obtained data is compared to the reconnoitered stocks.

Введение

Поиски большинства полезных ископаемых в основном 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 руд 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.

Актуальность оценки запасов месторождений полезных ископаемых Казахстана выражена в Стратегии «Казахстан–2030», где одним из основных приоритетов является развитие минерально-сырьевой базы республики.

Количественная оценка прогнозных запасов полезных ископаемых в месторождениях — важнейшая проблема прикладной геологии. Важные работы в этом направлении принадлежат учёным С.Дж. Ласки, А.М.Марголину, Н.И.Сафронову, Г.А.Булкину и ряду других [1–3]. Наиболее близким к предложенному нами в настоящем исследовании методу является метод Н.И.Сафронова [4].

Ядерно-физические методы

Магнитные методы опробования железных руд, где железо входит в состав слабомагнитных или немагнитных минералов, неэффективны. В этом случае наиболее перспективными являются ядерно-физические методы исследования и, в частности, гамма-гамма методы.

Гамма-гамма метод изучения состава и плотности пород и руд основан на регистрации рассеянного ими гамма-излучения от внешнего источника [5, 6]. В плотностном гамма-гамма-методе (ГГМ-П) с источниками излучения с энергией более 300 кэВ основным фактором изменения интенсивности вторичного гамма-излучения является комптоновское рассеяние [7]. В селективном гамма-гамма методе (ГГМ-С), использующем энергии гамма-квантов меньше (200–300) кэВ, но не меньше К-скачка поглощения, сечение фотоэлектрического поглощения сильно зависит от энергии гамма-кванта и атомного номера вещества, при этом интенсивность поглощения излучения источника растет с ростом атомного номера вещества (элемента).

Таким образом, при опробовании железных руд возможность использования гамма-методов основана на зависимости линейных коэффициентов ослабления гамма-излучения и коэффициентов преобразования первичного излучения во вторичное от плотности горных пород и руд и содержания в них железа [5]. Измерения в гамма-методах осуществляются либо в геометрии прохождения гамма-излучения через слой, либо в геометрии отражения гамма-излучения от слоя.

Конструкции зондовых устройств, используемых в ГГМ-П и ГГМ-С, принципиального отличия не имеют. Основные варианты их расположения (источник–детектор–исследуемая среда) приведены на рисунке 1.

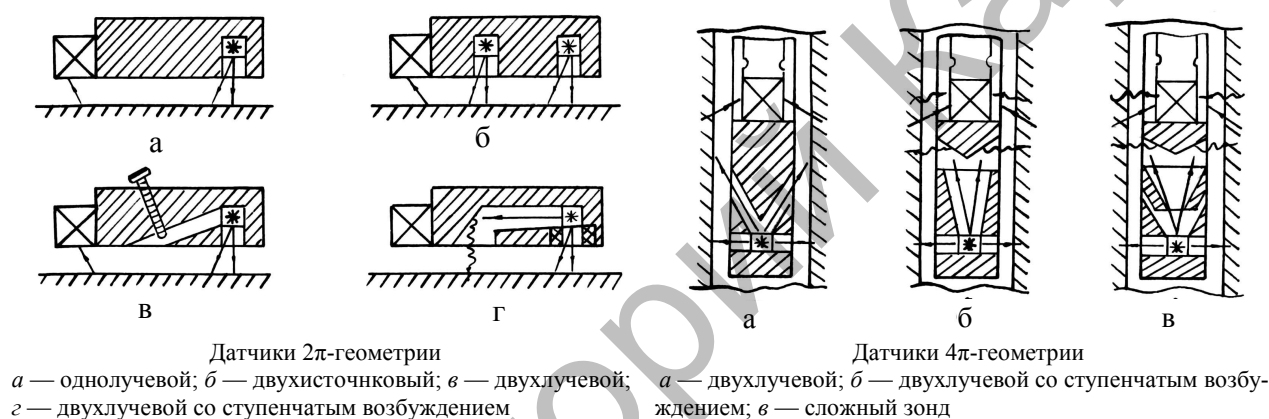


Рис. 1. Конструкции зондовых устройств для ГГМ-С

Основное условие использования ГГМ-С для количественных определений содержания железа в руде — наличие однозначной связи между его содержанием и эффективным атомным номером. Метод основан на регистрации рассеянного рудой низкоэнергетического (50–300) кэВ гамма-излучения. В качестве источников используют изотопы: Америций-241 ($E_j = 60$ кэВ, $T = 465$ дн.), Кобальт-57 ($E_j = 122$ кэВ, $T = 270$ дн.) и Селен-75 ($E_j = 121, 135, 265, 280, 401$ кэВ, $T = 127$ дн.). Для данного диапазона энергий основными эффектами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются эффект Комптона и фотоэлектрическое поглощение.

Для оценки величины взаимодействия гамма-излучения со сложной средой введено понятие эффективного атомного номера $Z_{эф}$ [5], который определяется как атомный номер некоторого условного элемента, линейный коэффициент ослабления которого равен коэффициенту для данной среды. Для энергий квантов менее 300 кэВ, но более энергии К-оболочки, эффективный атомный номер определяется по формуле

$$Z_{эф} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n C_i Z_i^3}.$$

Таким образом, при увеличении плотности железной руды и ее эффективного атомного номера растет сечение комптоновского рассеяния. График зависимости относительной к эталону (J_0) интенсивности рассеянного излучения (J/J_0) от содержания железа и плотности руд в буровзрывных скважинах Куржункульского месторождения приведен на рисунке 2.

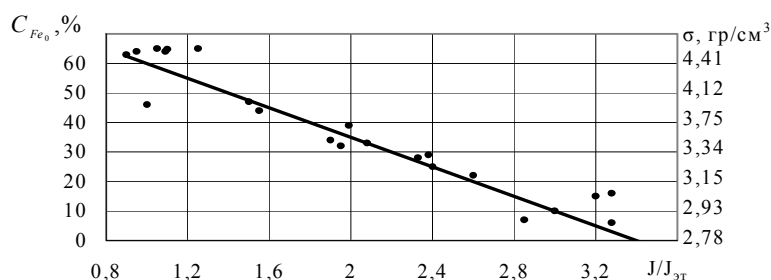


Рис. 2. Зависимость относительной интенсивности рассеянного гамма-излучения от содержания общего железа и плотности руд

Произведенные расчеты $Z_{эф}$ по среднему химическому составу железных руд месторождений Казахстана (рис. 3) показывают, что существует корреляционная зависимость между $Z_{эф}$ (Fe) и $Z_{эф}(m)$, т.е. железную руду можно представить как бинарную смесь наполнителя (легких окислов, в основном SiO_2) и полезных компонентов — окислов железа.

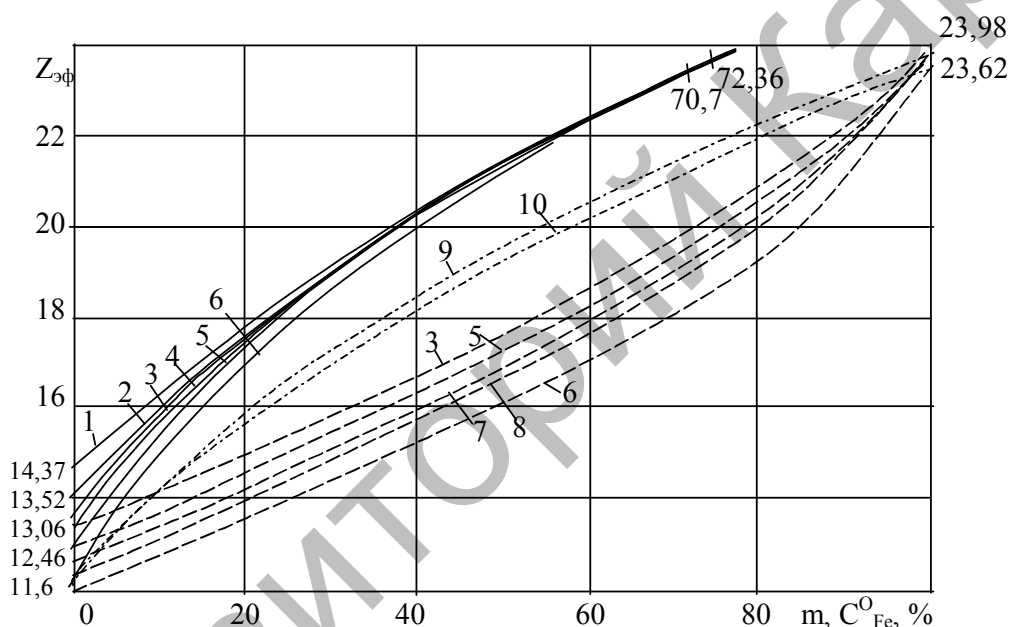


Рис. 3. Зависимость эффективного атомного номера от содержания железа и объемной концентрации магнетита: 1 — Малый Куйбас, гор. Дальняя; 2 — Кентобинское; 3 — Сарбайское; 4 — Куржункульское; 5 — Соколовское; 6 — Лисаковское; 7 — Качарское; 8 — Южно-Ломоносовское месторождения; 9 — $Z_{эф} = f(\text{Fe}_3\text{O}_4)$; 10 — $Z_{эф} = f(\text{Fe}_2\text{O}_3)$

Из рисунка 3 видно, что руды месторождений, содержащих значительное количество CaO (Малый Куйбас, г. Дальняя, Кентобе), отличаются по $Z_{эф}$ при содержании железа до 30 %, затем эти различия не существенны, что связывается с практически полным замещением окислами железа CaO . Графики $Z_{эф}$ (Fe) для магнетитовых ($\text{Fe} = 72,36$) и для гематитовых ($\text{Fe} = 70,70$) совпадают при $\text{Fe} > 40\%$. Графики 9, 10 отображают изменение $Z_{эф}$ от содержания магнетита и гематита. Пунктирными линиями показаны расчетные зависимости $Z_{эф}$ от объемной концентрации магнетита.

Как показано в работе [8], чувствительность метода к железу зависит от отношений сечений рассеяния и ослабления полезного компонента к наполнителю и от содержания полезного компонента. С увеличением содержания чувствительность к железу уменьшается. Отношение сечений существенно зависит от энергии первичного γ -излучения. Проведенные нами исследования с различными источниками гамма-излучения на пробах железных руд показывают, что с уменьшением энергии чувствительность к железу возрастает в пределах изменения энергии (60–200) кэВ (рис. 4).

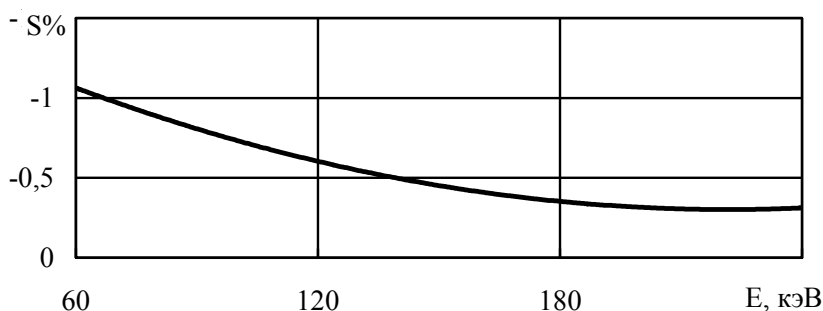


Рис. 4. Зависимость чувствительности метода ГТК-С к содержанию железа от энергии гамма-излучения

Предложенный нами термодинамический анализ магнитных методов измерения [9] может быть использован и для гамма-гамма-метода. Это связано с тем, что для такого подхода исследуемая среда характеризуется макроскопическими параметрами и рассматривается только отклик этой среды на внешнее поле. При этом механизмы микроскопических процессов, приводящих к рассеянию первичного излучения исследуемой средой, в рассмотрение не включаются. Отличие от раздела 1 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 из раздела 1 относительную интенсивность рассеянного гамма-излучения с энергией E_γ , мы получаем:

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

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

Из (1) 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:

$$C_{Fe} = 71 \cdot J / J_0. \quad (2)$$

Из экспериментальных данных имеем $C_{Fe} = 76 \cdot I/I_0$, что близко к (2) в пределах погрешности метода. Уравнения связи типа (1) и (2) можно получить и для других железосодержащих минералов, используя таблицу 1.

Т а б л и ц а 1

Некоторые параметры железосодержащих минералов

Формула	Минерал	$-\Delta G_{298}^0$, кДж/моль	Z_{ϕ}	$B \cdot 10^{-11}$ Дж ² /моль
$FeTiO_3$	Ильменит	1157119	21,6	5,33
Fe_3O_4	Магнетит	1014000	23,4	2,74
$\alpha-Fe_2O_3$	Гематит	741700	23,2	2,82
$FeCO_3$	Сидерит	679670	20,4	4,20
$\alpha-Fe(OH)$	Гётит	489900	23,9	2,56
FeS_2	Пирит	162600	21,7	4,20

На рисунке 5 показаны графики этих уравнений для различных минералов ($E_\gamma = 122$ кэВ). Здесь относительная интенсивность нормирована относительно интенсивности рассеяния гамма-излучения от чистого железа. Видно, что чувствительность ГТМ-С растёт с увеличением энергии Гиббса. Если руда содержит твердый раствор железосодержащих минералов, то, например, в случае бинарной сис-

темы I/I_0 зависит от соотношения компонент. Это следует из аддитивности энергии Гиббса $G^0 = X_1 G_1^0 + X_2 G_2^0$, где X_1, X_2 — мольные доли компонент 1 и 2, G_1, G_2 — их энергии Гиббса.

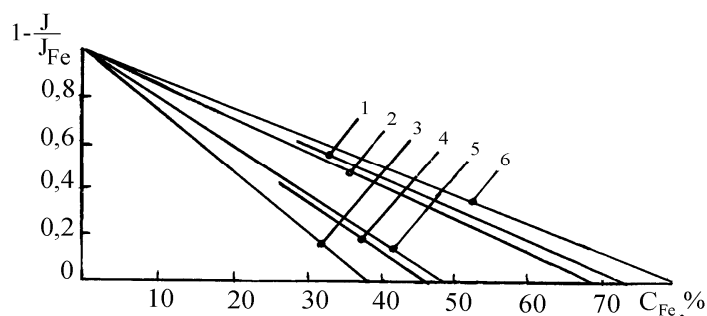


Рис. 5. Зависимость относительной интенсивной рассеянного гамма-излучения от содержания железа для различных минералов (источник ^{57}Co , $E_\gamma = 122$ кэВ): 1 — магнетит; 2 — гематит; 3 — ильменит; 4 — сидерит; 5 — гетит; 6 — пирит

Как следует из многочисленных исследований и рисунка 5, наибольшее влияние на результаты ГГМ оказывает минеральный (элементный) состав руды.

Однако наличие в знаменателе формулы (1) энергии E_γ позволяет компенсировать изменение G^0 так, чтобы выполнялось условие $I/I_0 \approx \text{const}$. Таким образом, анализируя (измеряя) термодинамические свойства исследуемой руды, можно выбрать оптимальный источник гамма-излучения. На практике это производится пока эмпирическим путем, исследуя зависимость $I/I_0 = f(C_{\text{Fe}})$ для различных источников. Используя уравнение (1), мы получили:

$$C_{\text{Fe}} = \text{const} \cdot G^0 \cdot \left(\frac{E_\gamma}{Z_{\text{эф}}} \right)^4. \quad (3)$$

Соотношение (3) показывает связь между определяемой концентрацией железа с характеристиками первичного гамма-излучения, эффективными атомным номером и термодинамическими свойствами среды.

В диффузионном приближении зависимость интенсивности рассеяния гамма-излучения веществом выражается в явном виде:

$$J/J_0 = \text{const} \cdot \frac{\rho}{R} e^{-\xi}, \quad (4)$$

где ρ — плотность вещества; $\xi = \bar{\mu} R$, $\bar{\mu}$ — коэффициент ослабления гамма-излучения; R — длина зонда.

Уравнения (1)–(4) определяют практически всю информацию, получаемую в методе ГГМ. Однако полученное нами соотношение (1) содержит меньшее число параметров и более удобно при интерпретации полученных на практике экспериментальных данных.

Чтобы перейти теперь к расчету прогнозных запасов в методе ГГМ, достаточно провести анализ, аналогичный проведенному в работе [10], и воспользоваться формулой (4). В результате получаем

$$P_\kappa = \frac{1}{\ln(q_4 I / I_0)} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $q_4 = 809826$.

Для ряда железорудных месторождений Казахстана прогнозные ресурсы, вычисленные с помощью формулы (5), представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

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
Кузган	23,4	14,6
Сарытобе	35,9	20

Поля-аналоги

Во многих областях техники и физики встречаются явления, представляющие собой прямые аналоги процессов в электрическом и магнитном поле (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Аналогия между величинами в потенциальных полях

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 $\text{grad}T$
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

Далее мы будем использовать метод аналогий и таблицу 3.

Гравитационная разведка

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.

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:

$$\frac{1}{f} = \frac{M_3}{gR_3^2} = \frac{\alpha}{g}, \quad \alpha = \frac{M_3}{R_3^2} = \text{const}, \quad (6)$$

где M_3 , R_3 — масса и радиус Земли.

Величине, обратной гравитационной постоянной, соответствует магнитная восприимчивость, для которой мы выше получили следующее выражение:

$$\varkappa = A \frac{C_m}{G^0}. \quad (7)$$

Тогда имеем следующую цепочку равенств:

$$\begin{aligned} \varkappa &= A \frac{C_m}{G^0} = \phi \frac{1}{f} = \phi \frac{\alpha}{g} \quad \text{или} \\ \frac{g}{\phi \alpha} &= \frac{G^0}{A C_m}, \quad \text{или} \\ \Delta g &= B \frac{\Delta G^0}{C_m}, \quad B = \frac{\phi \alpha}{A} = \text{const}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для дифференцированных запасов получим формулу

$$P_k = \frac{1}{\ln(q_5 \Delta g)} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $q_5 = 1002473$.

В качестве примера в таблице 4 представлены результаты расчета по формуле (9) прогнозных ресурсов некоторых угольных месторождений Казахстана, где проводилась гравиразведка.

Прогнозные и разведанные запасы некоторых угольных месторождений Казахстана

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

Сейсмическая разведка

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.

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

$$\vartheta_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (10)$$

$$\vartheta_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}}. \quad (11)$$

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 5.

Т а б л и ц а 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 $C_A = 1/\tau$
Сопротивление R	Акустическое сопротивление R_A

Для нас представляет интерес скорость частиц v , которая и является основой сейсморазведки. Согласно таблице 5 ей соответствует ток I , который согласно закону Ома пропорционален электропроводности σ и обратно пропорционален удельному сопротивлению. А согласно таблице 3 скорость частиц v пропорциональна магнитной восприимчивости.

Тогда для прогнозных запасов минерального сырья, используя данные сейсморазведки, мы получаем следующее выражение:

$$P_{\kappa} = \frac{1}{\ln(q_6 \vartheta)} \cdot 100\%, \quad (12)$$

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 6 представлены результаты расчета прогнозных дифференцированных ресурсов по формуле (12) для уже рассчитанных нами угольных свит Карагандинского

угольного бассейна по данным электроразведки. При этом нами использовались данные сейсмических исследований Б.М.Кенжина.

Т а б л и ц а 6

Прогнозные дифференцированные запасы угля основных свит Карагандинского угольного бассейна

Свита	Дифференцированные запасы (%) по ν (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.

Список литературы

1. *Lasky S.G.* How tonnage and grade relation help predict ore reserves // Eng. and Min. J. — 1951. — Vol. 151. — № 4. — P. 81–85.
2. *Марголин А.М.* Оценка запасов минерального сырья. Математические методы. — М.: Недра, 1974. — 264 с.
3. *Сафронов Н.И.* Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. — Л.: Недра, 1971. — 212 с.
4. *Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П.* Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. — Л.: Недра, 1978. — 215 с.
5. Гамма-гамма-метод в рудничной геологии / Под ред. Е.Д.Евдокимова. — М.: Недра, 1971. — 102 с.
6. *Пшеничный Г.А., Очкур А.П., Маренков О.С. и др.* Гамма-гамма-метод в рудничной геологии. — М., Атомиздат, 1974. — 450 с.
7. Скважинная ядерная геофизика. Справочник / Под ред. В.М.Запорожца. — М.: Недра, 1978. — 247 с.
8. *Якубович А.Л., Зайцев Е.Н., Пржиялговский С.М.* Ядерно-физические методы анализа минерального сырья. — М.: Недра, 1973. — 390 с.
9. *Портнов В.С., Юров В.М.* Термодинамические аспекты в магнитометрии // Тр. КарГТУ, 2003. — Вып. 2. — С. 36–41.
10. *Портнов В.С., Юров В.М.* Прогнозные запасы железорудных месторождений Казахстана // Промышленность Казахстана. — 2004. — № 12. — С. 82–83.