Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLV, вып. 2, 1963 г.

ПЕРЕСЧЕТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГАММА-КАРОТАЖА И ГАММА-ОПРОБОВАНИЯ УРАНОВЫХ РУД

В. А. Арцыбашев

Опробование урановых руд в естественном залегании (скважинах и горных выработках) производится по гамма-излучению. Оно основано на пропорциональной зависимости между интенсивностью излучения и количеством радиоактивных элементов в руде. Коэффициент пропорциональности при этом называют обычно пересчетным коэффициентом [3, 7]. Так как гамма-излучение урановой равновесной руды на 96—98% обусловливается гамма-излучением Ra^{226} и его продуктов распада, то пересчетный коэффициент представляет собой, по существу, удельную (приходящуюся на единицу содержания) регистрируемую детектором интенсивность равновесного спектра Ra^{226} при равномерном распределении гамма-излучателей в бесконечной среде (случай гамма-каротажа) или в полупространстве (случай гамма-опробования в выработках).

Теоретические расчеты равновесного спектра Ra^{226} в бесконечных средах различного вещественного состава [2] и основанные на них вычисления пересчетных коэффициентов не обладают необходимой для практики точностью из-за грубых допущений при расчетах. Экспериментальные данные по пересчетным гамма-каротажным коэффициентам [5] имеются для ряда практически важных сред, но они немногочисленны и не могут быть распространены на среду любого вещественного состава.

Ниже излагается принципиально новый метод определения пересчетных коэффициентов, а также результаты определений коэффициентов для каротажа и гамма-опробования.

Метод определения коэффициентов. Если известен закон ослабления гамма-излучения точечного источника Ra^{226} в бесконечной среде определенного состава, то можно получить интенсивность равновесного спектра интегрированием указанной зависимости по всему пространству. Так как гамма-поля обладают свойством суперпозиции в силу малой вероятности взаимодействия гамма-квантов друг с другом, то интегрирование поля точечного источника по любой области можно выполнить сравнительно легко. Зная регистрируемую интенсивность равновесного спектра Ra^{226} и учитывая долю, которую Ra^{226} составляет в гамма-излучении урановой руды, легко определить пересчетные коэффициенты.

Регистрируемое гамма-поле точечного источника Ra^{226} (здесь и в дальнейшем под источником Ra^{226} понимается Ra^{226} в равновесии с продуктами распада) в среде определенного состава и гео-

метрии и для определенного детектора выражается зависимостью

$$\frac{J}{A} = F(X), \tag{1}$$

где A — регистрируемая интенсивность при отсутствии поглощающей среды;

J — регистрируемая интенсивность после ослабления слоем среды с поверхностной плотностью X,

$$X = \rho r;$$

ρ — плотность среды;

r — толщина поглощающего слоя в линейных единицах.

Интенсивность источника при отсутствии поглощающей среды можно считать равной интенсивности в воздушной среде (пренебрегая ослаблением гамма-лучей в воздухе)

$$A = \frac{S}{r^2}, \tag{2}$$

где S — интенсивность на единице расстояния;

r — расстояние между источником и детектором (для точечных источника и детектора оно равно толщине поглощающего слоя).

Интенсивность точечного источника Ra^{226} на единице расстояния от него выражается произведением гамма-постоянной радия K_γ на весовое количество радия q [3]

$$S = K_\gamma q. \tag{3}$$

Если доля Ra^{226} в гамма-излучении равновесной урановой руды m, а q — количество Ra^{226} в 1 $г$ урановой руды, то интенсивность в бесконечной среде, равномерно заполненной урановой рудой, будет

$$J = \frac{hK_\gamma q}{m} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\rho}{r^2} F(X)\, r^2 \sin\Theta\, dr\, d\Theta\, d\varphi, \tag{4}$$

где r, Θ, φ — переменные сферической системы координат;

h — множитель, учитывающий усреднение эффективности детектора по углам падения гамма-квантов.

Введя замену переменных

$$r = \frac{X}{\rho}$$

и выполнив интегрирование по Θ и φ, получим

$$J = \frac{4\pi hK_\gamma q}{m} \int_0^{\infty} F(X)\, dX. \tag{5}$$

Пересчетный коэффициент бесконечной среды, очевидно, будет

$$K_1 = \frac{J}{q} = \frac{4\pi hK_\gamma}{m} \int_0^{\infty} F(X)\, dX. \tag{6}$$

В случае полупространства будут иные пределы интегрирования и в формуле (5) вместо 4π появится множитель 2π. Кроме того, подинтегральная функция $F(X)$ будет другой: она должна выражать закон ослабления гамма-лучей точечного источника в условиях полупространства, т. е. при размещении источника Ra^{226} внутри полубесконечной среды, а детектора — на ее поверхности.

Таким образом, задача определения пересчетных коэффициентов сведена к выяснению зависимости (1), т. е. к выяснению гамма-поля точечного источника в бесконечной или полубесконечной среде с учетом многократного рассеяния гамма-квантов.

Зависимость (1) можно получить экспериментально или рассчитать, причем эксперименты с точечным источником значительно проще экспериментов на моделях рудных тел и могут быть выполнены с высокой точностью.

Условия и исходные данные для расчетов коэффициентов. Пересчетные коэффициенты определены нами для бесконечной и полубесконечной среды любого практически интересного вещественного состава и четырех типов детекторов: газоразрядных счетчиков типа МС или СТС в гильзах с толщиной стенок 5 *мм* Fe, 3 *мм* Fe или Cu и 1—2 *мм* Al и сцинтилляционного детектора NaJ (Tl) в гильзе с толщиной стенок 1,2 *мм* Pb + 3 *мм* Fe.

Зависимость (1) установлена расчетами в сочетании с экспериментом для всех практически интересных моноэлементных сред [1]. По близости свойств ослаблять гамма-лучи элементы разделены на такие же группы, как и в случае источников Co^{60} и Cs^{137} *

Каждая группа с точностью 2—3% характеризуется одной определенной зависимостью (1). Среду любого вещественного состава, используя свойство суперпозиции гамма-полей, можно с точки зрения ослабления гамма-лучей представить в виде комбинации девяти выделенных сред. Можно также рассчитать пересчетные коэффициенты для девяти сред и затем перейти к пересчетным коэффициентам для реальных сред.

Для полубесконечной среды данные по зависимости (1) получены нами аналогичными способами.

Интеграл (6) вычисляется графически, но более удобно выразить зависимость (1) аналитической формулой и избавиться от численного интегрирования. Очень хорошую аппроксимацию зависимости (1) можно получить, используя формулу

$$\frac{J}{A} = Q_1 e^{-\alpha_1 X} + Q_2 e^{-\alpha_2 X} \tag{7}$$

где Q_1, Q_2, α_1, α_2 — постоянные коэффициенты.

Учитывая очевидное соотношение

$$J|_{X=0} = A \ (\rho = 0, \ r \neq 0),$$

устанавливаем связь между коэффициентами Q_1 и Q_2.

$$Q_1 + Q_2 = 1. \tag{8}$$

Таким образом, подбор эмпирической формулы сводится к определению трех коэффициентов: Q_1, α_1, α_2. Используя формулу (7), легко вычислить интеграл (6)

$$K_1 = \frac{4\pi h K_\gamma}{m}\left(\frac{Q_1}{\alpha_1} + \frac{Q_2}{\alpha_2}\right) \tag{9}$$

В табл. 1 приведены коэффициенты, полученные для девяти выделенных групп элементов, бесконечной среды и счетчика МС и СТС, экранированного 5 *мм* Fe.

Рассмотрим выбор постоянных K_γ, m, h, входящих в выражение (9). Доля гамма-излучения Ra^{226} в равновесной урановой руде принята

---

* См. статью настоящего Сборника: В. А. Арцыбашев «Метод абсолютных измерений объемного веса горных пород и руд по ослаблению гамма-лучей в широком пучке».

равной 0,96 для газоразрядного и 0,97 для сцинтилляционного счетчика [6]. В радиометрии интенсивность излучения определяется сравнением с излучением радиевого эталона и выражается в единицах мощности дозы — микрорентген в час. Гамма-постоянная K_γ, выражающая интенсивность излучения точечного источника с количеством Ra^{226} 1 *мг* на расстоянии 1 *см*, равна 8,4 *р/ч* при фильтрации излучения через 0,5 *мм* Pt [4]. Для руд в естественном залегании гамма-постоянная будет больше, так как в этом случае излучение не ослабляется фильтром. По нашим экспериментальным данным при фильтре 0,5 *мм* Pt излучение ослабляется на 3% при измерениях газоразрядным счетчиком и на 12% — сцинтилляционным. Тогда гамма-постоянная для руд в естественном залегании будет равна 9,1 *р/ч* в первом случае и 9,6 *р/ч* — во втором.

Таблица 1

Численные значения коэффициентов формулы (7)

Группа элементов	Q_i	α_1, $г^{-1}\,см^2$	α_2, $г^{-1}\,см^2$
Si	1,48	0,0427	0,0907
Al	1,43	0,0409	0,106
Fe	1,19	0 0395	0,202
Co	1 24	0,0385	0,185
Ag	1,11	0,0412	0,240
H_2O	1,34	0,0455	0,123
W	0,87	0,0426	0,220
Pb	0,83	0,0442	0,180
U	0,63	0,0470	0,140

Пересчетный коэффициент обычно рассчитывается для равногесной руды, содержащей 0,01 U, и выражается в микрорентгенах в час. Для перехода к указанным условиям надо увеличить K_γ в $3{,}4 \cdot 10^{-2}$ раз. Наконец, нужно учесть зависимость эффективности газоразрядного счетчика от угла Θ между его осью и направлением движения гамма-кванта. Выражается она (см., например, [12]) формулой

$$\varepsilon(\Theta) = \varepsilon_0 \frac{1 + \alpha \sin \Theta}{1 + \alpha}, \qquad (10)$$

где ε_0 — эффективность регистрации гамма-лучей, падающих перпендикулярно к оси счетчиков;

$\alpha = 0{,}5$.

Так как при эталонировании детектора точечным источником гамма-лучи падают под углом $\Theta = \frac{\pi}{2}$, а в бесконечной среде под всевозможными углами нужно учесть разницу между ε_0 и усредненной по углам эффективностью $\bar{\varepsilon}$ введением поправочного множителя $h = \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0}$. После усреднения (10) по всем углам

$$h = \frac{4 + \pi\alpha}{4(1 + \alpha)}. \qquad (11)$$

Учитывая, что при расчетном или экспериментальном установлении зависимости (1) происходит частичное усреднение эффективности по углам, для расчета h принята α, равная не 0,5, а 0,2. Тогда, согласно (11), для газоразрядного счетчика $h = 0{,}96$. Для сцинтилляционного счетчика принято $h = 1$, так как можно считать, что эффективность сцинтилляционного счетчика в первом приближении не зависит от Θ.

Численные значения коэффициентов для различных условий. Пересчетные коэффициенты вычислены для четырех типов детекторов и девяти групп элементов (табл. 2). Переход от этих коэффициентов к коэффициентам сложной среды, состоящей из элементов нескольких групп, осуществляется интерполяцией по формуле

$$\lg K = \sum_{i=1}^{N} p_i \lg K_i, \qquad (12)$$

где p_i — весовая доля элементов i-й группы;

K_i — коэффициент для i-й группы.

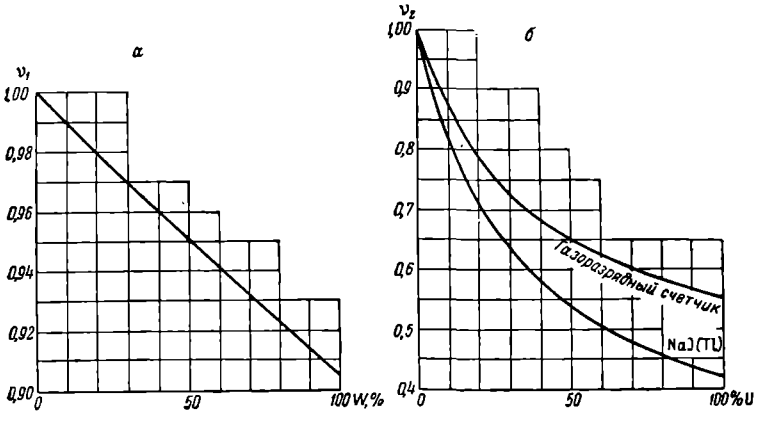
Таблица 2

Пересчетные коэффициенты для бесконечной среды K_1 и полупространства K_2, *мкр/ч*

Группа элементов	K_1 и K_2 для счетчиков							
	МС или СТС, гильза 5 *мм* Fe		МС или СТС, гильза 3 *мм* Fe		МС или СТС, гильза 1—2 *мм* Al		NaJ(Tl), гильза 1, 2 *мм* Pb + 3 *мм* Fe	
	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
Si	114	53	117	54	123	56	128	55
Al	121	57	124	58	130	58	137	59
Fe	114	53	116	54	122	55	119	51
Co	120	56	123	57	128	58	125	54
Ag	103	50	104	50	106	50	109	51
H_2O	104	49	106	49	111	50	118	51
W	82	41	82	41	82	41	75	38
Pb	77	38	77	38	77	38	67	34
U	63	32	63	32	63	32	54	27

Формула (12) получается как следствие аддитивных свойств среды при ослаблении гамма-лучей. Она будет справедлива для смеси элементов первых шести групп. Для смеси, содержащей элементы группы W, Pb, U, предварительно надо получить соответствующую такой смеси зависимость (1) и с ее помощью рассчитать коэффициент. Непосредственную интерполяцию между коэффициентами при наличии тяжелых элементов в смеси проводить нельзя.

Объединение элементов в группы приводит к усреднению пересчетных коэффициентов моноэлементных сред. Отличие коэффициен-



Зависимость поправки, вносимой в пересчетный коэффициент: *а* — от влажности; *б* — от содержания элементов группы урана

тов моноэлементных сред от средних по группам составляет не более ±2—3% для первых четырех групп и не более ±4—6% для групп тяжелых элементов.

Типичный состав урановых руд почти полностью определяется элементами группы Si, в которую входят Si, C, N, O, Mg, S, K, Ca. Примеси элементов группы Al и Fe не окажут заметного влияния на величину пересчетного коэффициента, так как весовая доля примесей и разница в величинах коэффициентов для основной группы Si и групп Al и Fe мала. Высокая влажность влияет на величину пересчетного коэффициента. На рисунке *а* приведен график поправочного коэффициента ν_1, который в виде множителя вводится в величину пересчетного коэффициента при соответствующей влажности руд W в весовых

процентах (отношение веса воды к весу влажной среды). Как видно из рисунка *а*, пересчетный коэффициент уменьшается примерно на 1% при повышении влажности на 10%.

Из тяжелых элементов практически важно учесть влияние U и Th, которые составляют группу U и могут в больших весовых количествах присутствовать в урановых рудах. На рисунке *б* представлен график поправки v_2, которую нужно вводить в пересчетный коэффициент в зависимости от содержания элементов группы урана. Поправка зависит от типа детектора. Ее величина при содержании урана и тория 1% равна 0,985 для газоразрядного счетчика и 0,975 для сцинтилляционного; при 2% U соответственно 0,970 и 0,955 и при 3% U — 0,955 и 0,935. Таким образом, величина пересчетного коэффициента заметно изменяется при содержании элементов группы урана 1—2% и выше.

Точность полученных пересчетных коэффициентов в основном определяется погрешностями графиков зависимости (1). По нашей оценке точность исходных материалов обеспечивает расчет коэффициентов с относительной погрешностью ±3—4%. Некоторая ошибка, возможно, внесена произвольными допущениями в оценке усреднения эффективности счетчиков по углам, а также при оценке поглощения излучения Ra^{226} в 0,5 *мм* Pt. Суммарная ошибка определения пересчетных коэффициентов не превышает ±4—6%.

Сравнение рассчитанных и экспериментальных коэффициентов. В качестве примера рассмотрим пересчетные коэффициенты для трех типов урановых руд (табл. 3) и сравним их с экспериментальными определениями коэффициентов, выполненными на моделях насыщенных пластов [7] *

Пересчетные коэффициенты определялись стандартными ка-

Таблица 3

Состав руд, для которых определялись пересчетные коэффициенты

Группа элементов	Химический состав, вес. %		
	Модель 1	Модель	Модель 3
Si	87	43	77
Al	5	6	7
Fe	5	27	6
Ag	3	6	—
H_2O		15	7

Таблица 4

Сравнение экспериментальных и расчетных величин пересчетных коэффициентов

Величина	Пересчетные каротажные коэффициенты		
	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Детектор-счетчик МС в гильзе с толщиной стенок 5 *мм* Fe			
Расчетная	114	112	113
Экспериментальная	117	109	112
Детектор-счетчик NaJ в гильзе 1,2 *мм* Pb + 3 *мм* Fe			
Расчетная	128	123	126
Экспериментальная	113	113	113

ротажными гильзами двух типов: счетчиком МС в гильзе с толщиной стенок 4—4 *мм* Fe и кристаллом NaJ(Tl), экранированным 1,2 *мм* Pb + + 3,0 *мм* Fe. Расчеты коэффициентов бесконечной среды для руд моделей 1, 2, 3 выполнены интерполяцией данных табл. 2 по формуле (12).

Как видно из табл. 4, экспериментальные и расчетные данные согласуются удовлетворительно, хотя для счетчика NaJ расчетные коэффициенты несколько выше экспериментальных.

Использование коэффициентов полупространства для гамма-опробования. В гамма-каротаже используется непосредственно пересчетный коэффициент бесконечной среды K_1. В гамма-опробовании рабо-

Материалы по химическому составу руд и экспериментальному определению пересчетных коэффициентов любезно предоставлены А. К. Овчинниковым.

чий пересчетный коэффициент зависит от геометрии экрана и определяется как количество поглощенного во вкладыше экрана излучения полупространства, приходящееся на 0,01% урана в равновесной руде. Иногда под рабочим коэффициентом понимают величину обратную [3].

Содержание урана при гамма-опробовании рассчитывается по формуле

$$q_1 = \frac{J_1 - J_2}{K_э}, \qquad (13)$$

где q_1 — содержание урана;

$K_э$ — рабочий коэффициент экрана;

J_1 и J_2 — интенсивность излучения полупространства, измеренная детектором в экране без вкладыша и с вкладышем.

Можно предложить следующий простой способ перехода от известного пересчетного коэффициента K_2 для полупространства к рабочему коэффициенту экрана $K_э$. Вначале определяется доля гамма-излучения полупространства γ, которая поглощается вкладышем конкретного экрана. Для этого достаточно измерить на рудном теле или на модели J_1, J_2 и J_0, где J_0 — интенсивность, измеренная без вкладыша и без экрана, т. е. интенсивность излучения полупространства. Искомая доля будет равна

$$\gamma = \frac{J_1 - J_2}{J_0}, \qquad (14)$$

а рабочий коэффициент экрана

$$K_э = \gamma K_2.$$

Величина γ может быть измерена для разных типов экранов заранее, что избавит от необходимости ее определения в полевых условиях.

ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод открывает новые возможности в определении пересчетных коэффициентов для различных, в том числе сложных условий.

2. Для детекторов с низкой эффективностью в области малых энергий гамма-лучей и типичных урановых руд можно принять постоянные пересчетные коэффициенты. При этом необходимо учитывать их зависимость от содержания урана и тория, а также от влажности, если ее величина значительна.

3. Предложенный способ определения рабочих коэффициентов экрана в гамма-опробовании позволяет избавиться от опытных работ на моделях и ввести для типичных экранов постоянные коэффициенты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арцыбашев В. А. Гамма-поле точечного источника Ra^{226} в различных средах. Сб. «Вопросы разведочной геофизики», вып. 2, Гостоптехиздат, 1962.

2. Воскобойников Г. М. Интенсивность гамма-излучения в однородной излучающей среде. Тр. Горно-геол. ин-та УФАН СССР. Геофиз. сб., 1957, № 2.

3. Граммаков А. Г., Шашкин В. Л., Ширяева М. Б. Руководство по гамма-опробованию радиоактивных пород в естественном залегании. Госатомиздат, 1959.

4. Краткий справочник инженера-физика. Ядерная физика, атомная физика. Госатомиздат, 1961.

5. Лебедев А. М., Троицкий С. Г., Шашкин В. Л. К вопросу о пересчетном коэффициенте для количественной интерпретации гамма-каротажа. «Атомная энергия», 1960, т. 10, вып. 4.

6. Межиборская Х. Б., Шашкин В. Л., Шумилин И. П. Анализ радиоактивных руд бета-гамма-методом. Атомиздат, 1960.

7. Овчинников А. К., Иващенко Т. Ф. Инструкция по гамма-каротажу. Госгеолтехиздат, 1957.