т. LVI, вып. 2, 1969 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ РУД И СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ДВУМ СОПРЯЖЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ РАССЕЯННОГО γ-ИЗЛУЧЕНИЯ

В. А. Арцыбашев, Г. А. Иванюкович

При изучении вещественного состава и физических свойств руд (плотности, влажности) методами ядерной геофизики в большинстве случаев результат измерения физического поля зависит от нескольких параметров среды. Обычно задачу сводят к однопараметровой, выбирая соответствующие условия и методику наблюдения. Возможности ядерной геофизики существенно расширяются, если изучение пород и руд рассматривать как многопараметровую задачу, решая ее несколькими сопряженными измерениями. Существует, например, одновременное определение плотности руд и содержания в них тяжелых элементов по двум измерениям γ-поля источников Co-60 и Cs-137 в условиях широкого пучка [Арцыбашев, 1962]; одновременное определение плотности пород и толщины глинистой корки по двум измерениям рассеянного γ-излучения с двумя различными длинами зондов [Wahl et al., 1964; Dodd, Droullard, 1966]. Аналогично решена задача опробования двухкомпонентных руд ртути путем комплексных измерений γ-поля и поля тепловых нейтронов [Егоров и др., 1966]. Можно сформулировать целый ряд трехпараметровых, четырехпараметровых и тому подобных задач, решение которых имеет большое практическое значение. Примером трехпараметровой задачи является определение эффективного атомного номера руды, ее плотности и одновременный учет влияния диаметра скважины.

В настоящей статье рассматривается решение двухпараметровой задачи на базе сопряженных измерений поля рассеянного γ-излучения. Предлагаемую схему графического составления и решения системы уравнений можно использовать при решении ряда других двухпараметровых задач.

Выбор сопряженных измерений. Определение двух параметров, например, плотности ρ и содержания Q тяжелого элемента (или эквивалентного ему эффективного атомного номера руды) сводится к решению системы двух уравнений

$$f(\rho, Q) = 0,$$
$$\varphi(\rho, Q) = 0. \qquad (1)$$

Им эквивалентны два измерения поля рассеянного γ-излучения

$$J_1 = F_1(\rho, Q),$$
$$J_2 = F_2(\rho, Q). \qquad (2)$$

цендентных уравнений является неравенство нулю ...

$$\frac{D(f,\varphi)}{D(\rho,Q)}=\begin{vmatrix}\frac{\partial f}{\partial \rho} & \frac{\partial f}{\partial Q}\\ \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} & \frac{\partial \varphi}{\partial Q}\end{vmatrix}\neq 0, \tag{3}$$

причем решение будет тем надежнее, чем больше величина якобиана

Качество сопряженных измерений с точки зрения надежности решения системы уравнений (2) удобно оценить отношением якобиана (3) к произведению диагональных членов

$$\Delta=\frac{\begin{vmatrix}\frac{\partial f}{\partial \rho} & \frac{\partial f}{\partial Q}\\ \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} & \frac{\partial \varphi}{\partial Q}\end{vmatrix}}{\frac{\partial f}{\partial \rho}\,\frac{\partial \varphi}{\partial Q}}. \tag{3'}$$

Производные функции f и φ (или F_1 и F_2) по соответствующим переменным выражают чувствительность первого и второго измерений к плотности и содержанию.

Условие (3) можно удовлетворить различными путями: выбрать первое измерение с большой чувствительностью к плотности и малой — к содержанию, а второе — наоборот; первое и второе измерения взять с одинаковой чувствительностью к плотности, но с резко различной — к содержанию и т. д. Для создания пары независимых измерений в общем случае можно использовать различные характеристики γ-поля: интегральный поток, энергетическое или угловое распределение рассеянных γ-квантов. Кроме того, возможны изменения энергии первичного излучения, расстояния между источником и детектором и других геометрических факторов. В рассматриваемом частном случае характеристики первого и второго измерений варьировали, меняя источник γ-излучения (Cs-137, Co-60), длину зонда R (расстояние между источником и детектором) и фильтр, играющий роль порогового дискриминатора рассеянного γ-излучения. Например, для изучения свинцовых руд выбрана следующая пара измерений поля рассеянного γ-излучения: первое измерение — источник Cs-137, детектор с фильтром 2 *мм* Pb, $R_1=30$ *см;* второе измерение — источник Co-60, детектор с фильтром 3 *мм* Al, $R_2=20$ *см*. В первом случае получена большая чувствительность к плотности и низкая — к содержанию свинца; во втором случае — наоборот.

Получение системы исходных уравнений. Систему (2) представим в виде двух графических уравнений, одно из которых показано на рис. 1. Для получения графиков необходимы в общем случае измерения на серии моделей с переменным содержанием и плотностью. Используя разработанные в плотностном γ-γ-методе приемы эталонирования зондов на одной среде известной плотности [Арцыбашев, 1965], можно существенно сократить число моделей (например, с 16 до 4). Рассмотрим процедуру получения исходных уравнений на конкретном примере.

Вначале примем $Q=0$ и найдем зависимость рассеянного γ-излучения от плотности. Для этого на одной среде известной плотности

ствами при нескольких (например, четырех) длинах зондов. Результаты оформляются следующим образом ($Q=0$, $\rho=1{,}85$ *г/см*^{3}):

R_2, *см*	ρR_2, *г/см*^{2}	J_2, отн. един.	R_2^2, *см*^{2}	$J_2 R_2^2 10^{-4}$
20	37,0	321	400	12,8
25	46,3	150	625	9,37
30	55,6	73,6	900	6,62
35	64,8	39,6	1220	4,79

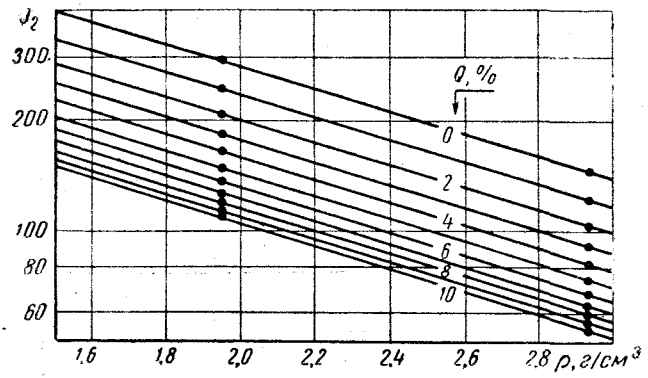


Рис. 1. Функция $J_2=F_2(\rho, Q)$. Источник Co-60, детектор NaJ(Tl) с фильтром 3 *мм* Al, $R_2=20$ *см*

По этим данным в инвариантных координатах [Арцыбашев, 1965] строится поле рассеянного γ-излучения. По графику рис. 2 очевидным способом можно построить график $Q=0$, показанный на рис. 1.

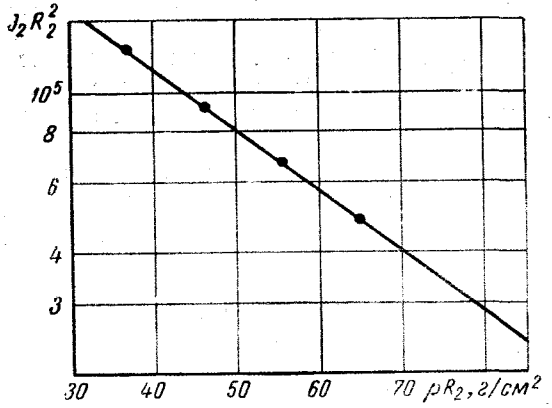


Рис. 2. γ-Поле источника Co-60 в инвариантных координатах (фильтр 3 *мм* Al)

Чтобы установить зависимость рассеянного γ-излучения от содержания в руде тяжелого элемента (свинца), необходимы измерения на нескольких, например, четырех средах с разным содержанием. Плотность желательно иметь близкой. Известно, что функция

$$J = \eta(Q) \qquad (4)$$

в общем случае зависит от массовой длины зонда ρR. Поэтому измерения на средах с различным содержанием свинца необходимы при

обтка результатов измерений одним измерительным устройством для получения значений функции $J/J_0=\eta(Q)$ (источник Co-60, фильтр 3 *мм* Al) в точке $\rho R=39$ *г/см*^{2} выглядит следующим образом:

ρ, *г/см*^{3}	Q, %	J_0	J	J/J_0
1,85	0	315	315	1,000
1,90	3,0	303	195	0,645
1,95	6,0	293	136	0,464
2,02	10,0	280	105	0,375

Величина J_0 равна рассеянному γ-излучению при $Q=0$ и неизменной плотности руды. Ее находят по графику $Q=0$ (рис. 1), зная плотность руды ρ. Функцию (4) строят в виде зависимости J/J_0 от Q (рис. 3).

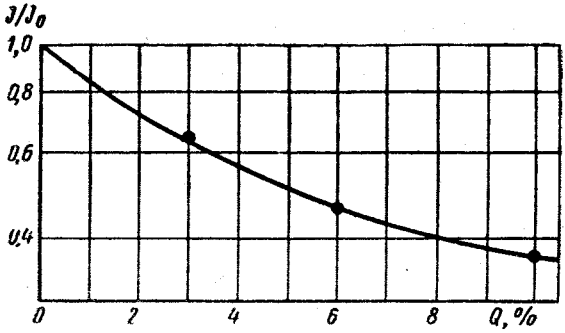


Рис. 3. Зависимость рассеянного γ-излучения Co-60 от содержания свинца ($\rho R=39$ *г/см*^{2}, фильтр 3 *мм* Al)

Зависимость (4) в двух точках ρR (следовательно, для двух значений плотности, если длина зонда постоянная) наносят на график функции $J=F(\rho, Q)$, как это показано точками на рис. 1, а затем проводят прямые семейства Q. На этом завершается графическое составление исходных уравнений по экспериментальным данным.

Решение системы графических уравнений. В общем случае решение системы двух уравнений, каждое из которых имеет вид графиков, показанных на рис. 1, состоит в построении семейства прямых ρ и Q в прямоугольной системе координат J_1 и J_2. При решении рассматриваемой конкретной задачи с целью улучшения вида номограммы введены промежуточные координаты N_1, N_2. Переход

$$J_1 \to N_1, \quad J_2 \to N_2 \tag{5}$$

выполняется с помощью графика функции

$$J = F(\rho, Q) \tag{6}$$

при $Q=0$ (рис. 1). Другими словами, N_1 и N_2 являются эквивалентами J_1 и J_2, выраженными в единицах плотности.

Общий вид графического решения системы (2) показан на рис. 4. Вспомогательные номограммы, выполняющие преобразование (5), получаются непосредственно из уравнений (2) (см. график $Q=0$, рис. 1). Для построения ядра номограммы исходные уравнения следует трансформировать в таблицу (см. табл. 1) и по ее данным нанести

на номограммах поясняют их применение.

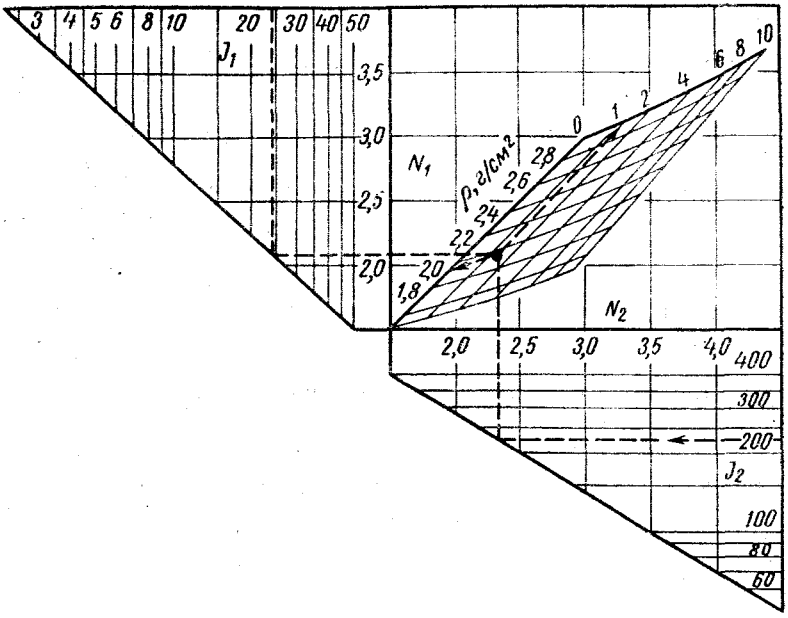


Рис. 4. Графическое решение системы двух уравнений

Контроль полученного решения. Графическое решение системы уравнений (2) осуществлено обработкой 20 измерений (8 измерений на среде с нулевым содержанием свинца и 12 — на трех средах с содержаниями свинца от 3 до 10%). Исходная система и полученное решение (рис. 4) справедливы для зондов $R_1=30$ *см* (источник Cs-137) и $R_2=20$ *см* (источник Co-60). Контрольная проверка состояла в том, что по восьми измерениям на четырех использованных моделях при указанных выше длинах зондов вычислены плотность и содержание свинца и сопоставлены с истинными значениями (табл. 2).

Таблица 1

Исходные данные для построения номограммы

ρ, г/см³	При $Q=0$		При $Q=10\%$	
	N_1	N_2	N_1	N_2
1,5	1,5	1,5	1,96	2,92
2,0	2,0	2,0	2,93	3,41
2,5	2,5	2,5	3,16	3,87
3,0	3,0	3,0	3,69	4,39

Таблица 2

Интерпретация сопряженных измерений на моделях рудных тел

J_1	J_2	N_1	N_2	Результаты интерпретации		Истинные значения	
				ρ, г/см³	Q, %	ρ, г/см³	Q, %
32,0	321	1,87	1,83	1,89	—0,1	1,85	0
21,5	185	2,18	2,60	1,97	2,6	1,90	3,0
16,3	136	2,40	3,05	2,01	5,6	1,95	6,0
14,9	105	2,47	3,24	1,98	9,0	2,02	10,0

Как видно, метод сопряженных измерений позволяет достаточно точно определять и плотность, и содержание. В полевых условиях неизбежны дополнительные помехи, снижающие точность. Однако случайные ошибки можно устранить статистическим осреднением результатов.

Предлагаемая схема определения плотности и содержания тяжелых элементов по двум сопряженным измерениям поля рассеянного γ-излучения применима и при решении других аналогичных задач. Наиболее общее значение имеет графическая форма системы двух уравнений и графический способ ее решения.

Предлагаемое обобщение не подменяет найденные ранее решения отдельных двухпараметровых задач и не исключает исследований при решении новых задач. В каждом конкретном случае необходимо выбрать оптимальные характеристики сопряженных измерений, методику эксперимента и способ обработки данных при составлении системы исходных уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

Арцыбашев В. А. К вопросу определения содержания тяжелых элементов в рудах при измерениях объемного веса по ослаблению гамма-лучей. В сб. «Вопросы разведочной геофизики», вып. 2. Л., Гостоптехиздат, 1962, стр. 81—86.

Арцыбашев В. А. Гамма-метод измерения плотности. Атомиздат, 1965.

Егоров Э. В. и др. Комплексный метод опробования ртутных руд сложного вещественного состава в условиях подземных скважин. В сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 6. Л., ЛГУ, 1966, стр. 104—110.

Dodd P. H., Droullard R. F. A logging system and computer programme to determination rock density of uranium deposits Radioisotope Instr. in Industry and Geoph. v. 2. Vienna, IAEA, 1956, p. 205—225.

Wahl J. S. et al. J. Petrol. Technol., 1964. p. 1411—1416.