

Б17541⁽²⁾

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ СССР

В. А. АРЦЫБАШЕВ

**КРАТКОЕ РУКОВОДСТВО
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ
ПЛОТНОСТИ ПОРОД И РУД
МЕТОДОМ ОСЛАБЛЕНИЯ
ГАММА-ЛУЧЕЙ**

ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ

Б17541⁽²⁾

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ СССР

В. А. АРЦЫБАШЕВ

КРАТКОЕ РУКОВОДСТВО
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ
ПЛОТНОСТИ ПОРОД И РУД
МЕТОДОМ ОСЛАБЛЕНИЯ
ГАММА-ЛУЧЕЙ



169562



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ГЕОЛОГИИ И ОХРАНЕ НЕДР
МОСКВА 1963

17.АВГ.1963

Ответственный редактор В. В. Алексеев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Успехи в области ядерной физики и измерительной техники позволили создать и применить в геологии и инженерной геологии новый метод определения плотности* горных пород и руд с помощью гамма-лучей.

Гамма-метод дает возможность определять плотность горных пород и руд в естественном залегании без нарушения их структуры, при сохранении естественной влажности, пористости и трещиноватости. По сравнению с другими методами он обеспечивает более высокую производительность исследований, высокую точность определения плотности и является более экономичным.

Существуют три модификации гамма-метода определения плотности горных пород и руд: метод рассеянного гамма-излучения, метод ослабления гамма-лучей в узком пучке и метод ослабления гамма-лучей в широком пучке. Каждая из этих модификаций имеет свои преимущества и недостатки.

Метод рассеянного гамма-излучения применяется для определения плотности горных пород и руд (по жесткой компоненте рассеянного излучения) и содержания некоторых тяжелых химических элементов (по мягкой компоненте рассеянного излучения) в скважинах [3]. В настоящее время предложено использовать этот метод для определения плотности пород в горных выработках и в обнажениях [19]. Метод рассеянного гамма-излучения позволяет производить исследования в глубоких скважинах. Его недостатком является большая зависимость результатов наблюдений от состояния стенок скважин и поверхности горных выработок (неровности, каверны, глинистые корки т. п.).

Определение плотности горных пород и руд методом ослабления гамма-лучей в узком (коллимированном) лучке производится в двух параллельных шпурах, в одном из которых помещается направленный источник гамма-лучей, в другом — приемник для измерения интенсивности ослабленного первичного излу-

* В технической и геологической литературе употребляется термин «объемный вес», являющийся синонимом термина «плотность». Оба термина обозначают величину, равную отношению массы вещества к его объему, т. е. массу единицы объема.

чения источника [11, 13, 18]. Метод позволяет детально расчленивать горные породы и руды по плотности в вертикальном разрезе, но требует применения направленных источников и приемников. Процесс измерения в узком пучке является более трудоемким по сравнению с методом широкого пучка.

Определение плотности горных пород и руд методом ослабления гамма-лучей и в широком пучке также производится в двух параллельных шпурах, но в отличие от метода узкого пучка измеряется суммарная интенсивность гамма-излучения, состоящая из первичного ослабленного излучения источника и многократно рассеянного излучения [9, 10, 17, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30]. Интенсивность излучения в широком пучке в 5—10 раз больше интенсивности первичного направленного излучения, поэтому метод широкого пучка обеспечивает более высокую точность определения плотности и более высокую производительность наблюдений. Этот метод значительно проще, чем метод узкого пучка. Его недостатком является небольшая глубинность исследований, зависящая от глубины шпуров (от 0,2 до 1,5 м).

В настоящем руководстве подробно изложены правила определения плотности горных пород и руд методом ослабления гамма-лучей в широком пучке с помощью серийной радиометрической аппаратуры и распространенных источников излучений. Рекомендуемая методика абсолютных измерений плотности не требует предварительной эталонировки аппаратуры эталонами плотности и обеспечивает приемлемую для практики точность — статистические ошибки около 2—3%, систематические 1,0—1,5%. Метод может применяться для определения плотности горных пород и руд при подсчете запасов минерального сырья, при изучении плотности грунтов, оснований сооружений, дорожных покрытий, насыпей и т. п. Кроме того, метод можно использовать для определения содержания железа и хрома в рудах при условии устойчивой корреляции между содержанием этих полезных ископаемых и плотностью руд.

Считаю приятным долгом выразить признательность В. Л. Шашкину, Г. Ф. Новикову, Е. И. Железновой и М. М. Соколову, просмотревшим рукопись и сделавшим ряд ценных замечаний.

Глава I

ТЕОРИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ СЛОЖНЫХ СРЕД ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ГАММА-ЛУЧЕЙ В ШИРОКОМ ПУЧКЕ

Введение

Сущность процессов взаимодействия гамма-излучения с веществом подробно разобрана во многих работах [4, 7, 8, 12, 14]. Поэтому, в руководстве приводятся лишь самые общие сведения, которые необходимы для понимания физических основ гамма-метода определения плотности.

В интервале энергий гамма-лучей от 20 кэв до 10 Мэв число возможных процессов взаимодействия гамма-лучей с веществом велико. Среди них основными процессами ослабления гамма-лучей являются фотоэлектрический эффект, образование пар и комптоновское рассеяние. Остальные процессы можно не принимать во внимание при определении плотности.

Сечения основных процессов ослабления гамма-лучей являются функциями атомного номера Z и постепенно меняются от элемента к элементу периодической системы. При атомном фотоэлектрическом эффекте падающий гамма-квант полностью передает свою энергию одному из электронов атома, удаляя его из атома. С ростом энергии падающего гамма-кванта поперечное сечение, характеризующее вероятность фотоэлектрического поглощения, быстро уменьшается. В интересующей нас области энергий для элементов с низким атомным номером Z фотоэлектрический эффект играет несущественную роль. С ростом Z быстро возрастает энергия связи электронов в атоме, и фотоэлектрический эффект приобретает большое значение. Поперечное сечение фотоэлектрического эффекта растет с увеличением атомного номера пропорционально Z^n , где $4 < n < 5$.

При образовании пар вся энергия падающего гамма-кванта передается электрону плюс позитрон. Процесс образования пар имеет энергетический порог, равный 1,022 Мэв, ниже которого он невозможен. Образование пар может происходить в электри-

ческом поле ядра, либо в поле электрона атома. Вероятность образования пар в поле ядра зависит от атомного номера как Z^2 . Полное сечение образования пар быстро растет с ростом атомного номера и энергии гамма-кванта.

Рассмотренные эффекты взаимодействия гамма-лучей с веществом являются процессами истинного поглощения гамма-кванта. Наоборот, комптоновский эффект представляет собой процесс рассеяния на свободных электронах, в результате которого меняются как направление движения, так и энергия падающих гамма-квантов. Поскольку рассеивающие электроны практически можно считать свободными и не взаимодействующими между собой, эффект рассеяния оказывается строго аддитивным, поэтому поперечное сечение рассеяния для атома пропорционально Z . Для всех элементов комптон-эффект является преобладающим процессом взаимодействия в широком энергетическом интервале.

Полное сечение взаимодействия гамма-кванта с веществом, которое следует использовать при расчетах ослабления излучения, представляет собой сумму поперечных сечений для фотоэлектрического эффекта, комптоновского рассеяния и эффекта образования пар:

$$\sigma = \sigma_{\text{ф}} + \sigma_{\text{к}} + \sigma_{\text{п}}. \quad (1)$$

Полное поперечное сечение, отнесенное к одному атому, определяется как микроскопический коэффициент ослабления. Макроскопический коэффициент ослабления μ представляет собой произведение плотности рассеивателей на микроскопическое сечение и может быть выражен различными способами. Наиболее полезным для расчетов является массовый коэффициент ослабления, выраженный в $\text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$. Для отдельного элемента:

$$\mu = \frac{N}{A} \sigma,$$

где N — число Авогадро;
 A — атомный вес.

Численно это дает:

$$\mu[\text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2] = \frac{0,6025}{A} \cdot \sigma[\text{барн/атом}].$$

Коэффициент ослабления также выражается в виде линейного коэффициента ослабления, имеющего размерность обратной длины и характеризующего вероятность взаимодействия гамма-кванта на единице пути. В метрических единицах

$$\mu[\text{см}^{-1}] = \rho[\text{г} \cdot \text{см}^{-3}] \cdot \mu[\text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2],$$

где ρ — плотность.

Таким образом, линейный коэффициент ослабления зависит от плотности среды и ее вещественного состава; кроме того, он существенно зависит от энергии гамма-лучей.

В методе широкого пучка детектор регистрирует суммарную интенсивность гамма-излучения, состоящую из ослабленного первичного излучения источника и многократно рассеянного излучения. Относительное количество рассеянных гамма-квантов, испытавших один, два и т. д. актов взаимодействия с атомами среды, быстро увеличивается с увеличением толщины поглотителя. Даже для сравнительно небольшой глубины проникновения количество рассеянных гамма-квантов в 5—10 раз превышает количество первичных гамма-квантов. Рассеянное гамма-излучение образует непрерывный энергетический спектр, верхняя граница которого соответствует энергии первичного излучения, а нижняя — области поглощения в результате фотоэлектрического эффекта [7, 12].

Закон ослабления гамма-излучения в широком пучке можно рассчитать теоретически [12] или установить экспериментально. В случае точечного источника, помещенного в безграничную моноэлементную среду, его можно записать в следующем виде:

$$\frac{I(r)}{A(r)} = F(\rho d, Z, E_0), \quad (4)$$

где $A(r)$ — интенсивность гамма-излучения в точке r при отсутствии поглощающей среды;

$I(r)$ — интенсивность в точке r при наличии поглотителя толщиной d ;

ρ — плотность поглощающей среды;

ρd — поверхностная плотность поглощающей среды;

Z — атомный номер элемента, слагающего поглощающую среду;

E_0 — энергия первичного излучения источника.

При постоянном вещественном составе поглощающей среды ($Z = \text{const}$) и одних и тех же источниках излучения ($E_0 = \text{const}$) отношение $\frac{I}{A}$ является только функцией поверхностной плотности ρd , т. е.

$$\frac{I(r)}{A(r)} = F(\rho d). \quad (5)$$

Зависимость (5) можно легко найти экспериментальным путем, измеряя интенсивность $I(r)$ при различных значениях поверхностной плотности ρd . Различные значения поверхностной плотности наиболее удобно получать путем изменения толщины поглотителя d . Интенсивность $A(r)$ обычно измеряется в воздухе, причем поглощением пренебрегают.

По формуле (5) можно легко определять плотность горных пород и руд. Необходимо только всегда помнить, что зависимость (5) справедлива для вполне конкретных условий, в которых она наблюдалась или рассчитывалась. На практике обычно эти условия (широкий пучок, безграничная среда определенного состава, одни и те же типы источников излучения и детекторов) легко сохраняются, за исключением вещественного состава,

который в случае горных пород и руд может быть весьма различным. Влияние вещественного состава среды на результаты определения плотности можно свести до минимума путем выбора соответствующей энергии первичного излучения, при которой преобладающим процессом взаимодействия гамма-излучения с веществом будет комптоновское рассеяние.

Из соотношения (2) следует, что при определенной энергии первичного излучения, при которой коэффициенты α_1 и α_3 будут иметь минимальное значение, а коэффициент α_2 — максимальное значение, зависимость линейного коэффициента ослабления от вещественного состава пород и руд будет минимальной, поскольку отношение $\frac{Z}{A}$, за исключением водорода, для всех элементов примерно равно 0,5—0,4. При этих условиях результаты определения плотности будут меньше всего зависеть от изменения вещественного состава. Энергии, обеспечивающие эти условия, лежат в диапазоне от 0,5 до 3,0 Мэв.

В широком пучке имеются вторичные рассеянные гамма-лучи низких энергий, образующие сплошной энергетический спектр. По мере уменьшения энергии рассеянного излучения возрастает фотоэлектрическое поглощение, которое в средах с большим Z сильно сказывается на коэффициенте ослабления μ . Для того, чтобы исключить влияние мягкого рассеянного излучения при определении плотности используются детекторы, имеющие низкую эффективность в области малых энергий гамма-лучей.

Результаты расчетов гамма-излучения точечного источника в однородных моноэлементных средах [2] показывают, что при соблюдении всех указанных условий зависимость (5) сравнительно медленно изменяется с изменением вещественного состава среды. Благодаря этому различные моноэлементные среды по степени ослабления гамма-лучей точечных источников можно объединить в группы, состоящие из нескольких химических элементов. Такие группы приведены в табл. 1, где на первом месте стоит наиболее характерный химический элемент. В отдельную группу выделена вода, имеющая отличный от других групп коэффициент ослабления гамма-лучей из-за большого содержа-

Таблица 1

Номер групп	Состав групп
1	Si, C, N, O, Mg, S, K, Ca
2	Al, Na, P, Cl
3	Fe, Ni, Cu, Zn
4	Co, Ti, V, Cr, Mn
5	Ag, Mo, Sn, I, Ba
6	H ₂ O
7	W
8	Pb, Pt, Au, Hg, Bi
9	U, Th

ния водорода, для которого $\frac{Z}{A} = 1$. Объединение различных моноэлементных сред в группы позволяет характеризовать их одним графиком, построенным по зависимости (5). Ошибка, которая при этом допускается за счет пренебрежения различием между осредненным графиком и графиками для моноэлементных сред, входящих в группу, не превышает 1% ρd для первых пяти групп и 2% ρd для двух последних групп.

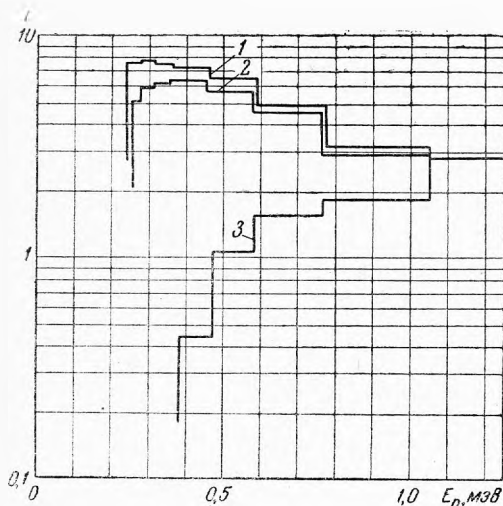


Рис. 1. Спектральный состав регистрируемого гамма-излучения источника Co^{60} в различных средах (детектор — газоразрядный счетчик типа МС или СТС в железной гильзе с толщиной стенок 5 мм)
1 — вода; 2 — железо; 3 — свинец

Объединение ряда моноэлементных сред в девять групп значительно облегчает задачу определения плотности горных пород и руд.

Для практического применения графики зависимости (5) строятся в полулогарифмическом масштабе ($\lg \frac{I}{A}$; ρd). Такие графики для девяти выделенных групп химических элементов, двух типов детекторов и трех типов источников излучения приведены в прилож. 7—12. Эти графики используются для определения плотности горных пород и руд.

Горные породы и руды представляют собой сложные среды, состоящие из элементов нескольких групп табл. 1. Зависимость (5) для таких сред можно получить путем интерполяции между известными графиками ослабления гамма-излучения в отдельных компонентах смеси.

Методика интерполяции между графиками ослабления гамма-лучей в различных средах зависит от спектрального состава регистрируемого излучения. Анализ спектрального состава излучения можно провести, воспользовавшись приближенным представлением спектра, которое получается в процессе расчета интегральной интенсивности методом последовательных столкновений [2]:

$$\frac{I}{A} = \sum_{n=0}^M \frac{I_n}{A}, \quad (6)$$

где I_n — спектральная интенсивность гамма-излучения с энергией квантов E_n .

Наблюдаемый спектр гамма-излучения, соответствующий приближенному выражению (6), изображен на рис. 1 для $\rho d = 100 \text{ г/см}^2$. По оси ординат отложена плотность спектральной интенсивности I , нормированная к интенсивности первичного излучения:

$$I = \frac{\Delta I}{\Delta E_n} \cdot \frac{1}{I_0} = \frac{I_n}{\Delta E_n} \cdot \frac{1}{I_0} \quad (7)$$

Линейный коэффициент ослабления в сложной среде равен среднему арифметическому из линейных коэффициентов ослабления в компонентах смеси с учетом их весовой доли [1]. Линейный коэффициент ослабления моноэнергетического излучения пропорционален логарифму интенсивности [1], следовательно, линейную интерполяцию, применимую к вычислению коэффициента ослабления в сложной среде, можно также проводить по отношению к логарифму спектральной интенсивности I_n :

$$\lg \frac{I_n}{A} = \sum_{i=1}^L p_i \left(\lg \frac{I_n}{A} \right)_i, \quad (8)$$

где p_i и $\left(\lg \frac{I_n}{A} \right)_i$ — соответственно, весовая доля i -го компонента сложной среды и логарифм спектральной интенсивности в i -ом компоненте.

Используя выражения (6) и (8), получаем выражение для интенсивности излучения в сложной среде:

$$\frac{I}{A} = \sum_{n=0}^M \exp \left[2,3 \sum_{i=1}^L p_i \left(\lg \frac{I_n}{A} \right)_i \right], \quad (9)$$

которое можно назвать формулой интерполяции по спектру.

Если спектральную интенсивность излучения в i -ом компоненте среды можно представить в виде:

$$\left(\lg \frac{I_n}{A} \right)_i = \lg \frac{I_n^*}{A} + \lg K_i, \quad (10)$$

то легко показать, что выражение (9) преобразуется к виду:

$$\frac{I}{A} = \exp \left[2,3 \sum_{i=1}^L p_i \left(\lg \frac{I}{A} \right)_i \right] \quad (11)$$

или

$$\lg \frac{I}{A} = \sum_{i=1}^L p_i \left(\lg \frac{I}{A} \right)_i. \quad (12)$$

Выражение (12) можно назвать формулой интерполяции по интегральной интенсивности.

Физический смысл условия (10) заключается в следующем. Величина K_i зависит только от среды и глубины проникновения,

на которой рассматривается гамма-спектр, и не зависит от n . Величина $\lg \frac{I_n^*}{A}$ не зависит от i , т. е. является одной и той же для всех компонент смеси. Таким образом, из условия (10) вытекает возможность совмещения спектров всех компонент смеси в единый спектр путем смещения на одну и ту же для всех n величину $\lg K_i$.

На рис. 1 в логарифмическом масштабе представлены спектры в трех средах. Согласно выражению (10) полное совмещение спектров без изменения их формы производится путем их перемещения в направлении оси I .

Спектры в H_2O и Fe можно совместить друг с другом (допуская при этом некоторую погрешность), в то время, как спектр в Pb настолько отличается от спектров в H_2O и Fe, что их совмещение практически невозможно. При выполнении условия (10) получаем подобие спектров по форме, поэтому и спектры, удовлетворяющие этому условию, можно назвать подобными.

Таким образом, интерполяция при установлении зависимости (5) для сложной среды может выполняться или по спектру (общий случай), или по интегральной интенсивности (частный случай). В последнем случае спектры должны быть подобны.

Глава II

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И РУД

Определение плотности горных пород

Для определения плотности конкретной породы нужно знать соответствующую ей зависимость (5), которую можно найти путем интерполяции между известными зависимостями для выделенных групп элементов. Интерполяция производится с использованием сведений о химическом составе породы.

В табл. 2 приведен типичный элементный состав наиболее распространенных горных пород. Сравнение этой таблицы с табл. 1 показывает, что в состав горных пород входят, в основном, элементы групп Si, Al, Fe, Co и H_2O .

Спектры рассеянного гамма-излучения в перечисленных группах элементов подобны друг другу, что позволяет производить интерполяцию по интегральной интенсивности излучения (12). Используя соответствующие графики из прилож. 7—12 и сведения о вещественном составе горной породы, легко рассчитать необходимый для определения плотности график ослабления гамма-лучей.

Графики зависимости (5) для различных горных пород мало отличаются от графика группы Si, являющегося основным. Это объясняется тем обстоятельством, что большинство горных пород состоит преимущественно из элементов группы Si с небольшими примесями элементов других групп, причем разница между графиками для пяти перечисленных групп элементов сравнительно невелика (см. прилож. 7—12).

Графики ослабления гамма-лучей почти для всех пород практически совпадают с графиками для группы Si (см. рис. 2). Расхождения в этом случае не превышают 0,5% *rd*. Исключение составляют менее распространенные породы, графики ослабления гамма-лучей в которых заметно отличаются от графиков группы Si (кривые 2, 3, 4 и 5 на рис. 2).

Для других источников и детекторов соотношения между графиками ослабления гамма-лучей в различных породах будут

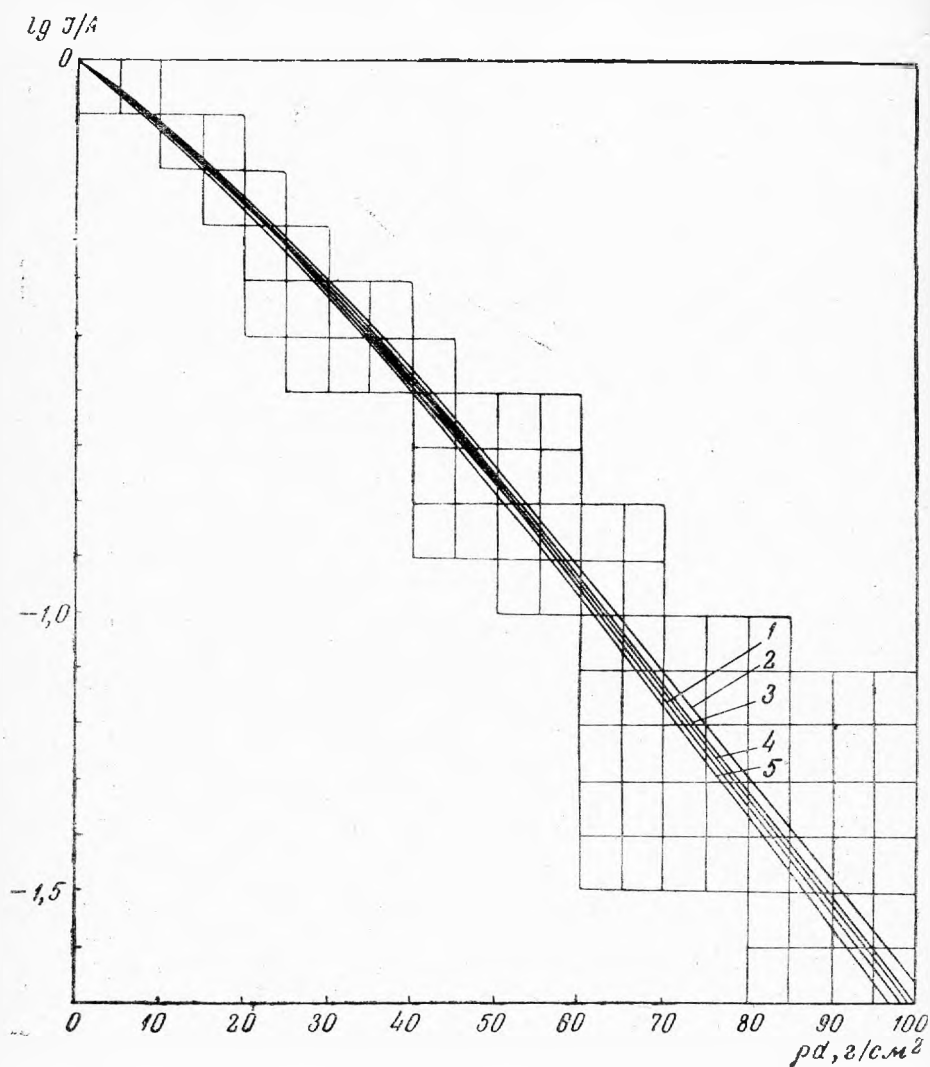


Рис. 2. Графики ослабления гамма-излучения источника Co^{60} в различных горных породах (детектор — газоразрядный счетчик типа МС или СТС в железной гильзе с толщиной стенок 5 мм)

1 — основной график группы Si; 2 — марганцевые породы; 3 — железистые породы; 4 — щелочные изверженные породы; 5 — гипс и ангидрит

несколько иными, но во всех случаях влияние вещественного состава незначительно. Учитывая это обстоятельство, можно использовать усредненные данные табл. 2 для оценки разницы между графиком ослабления гамма-лучей группы Si и графиком ослабления для конкретной горной породы.

Необходимо особо рассмотреть вопрос об учете влажности. Расхождение между основным графиком группы Si и графиком ослабления гамма-лучей для H_2O во всех случаях составляет около 8% ρd (см. прилож. 7—12). Следовательно, для того, чтобы получить истинное значение плотности горной породы в естественном залегании, необходимо в значения плотности, вычисленные с помощью графика группы Si, ввести поправку, равную 0,992 на каждые 10% влажности. Если используемый график ослабления гамма-лучей отличается от графика группы Si, то влажность учитывается так же, как изменение вещественного состава, т. е. путем интерполяции между соответствующими графиками по интегральной интенсивности.

Определение плотности руд

Рудные элементы, как правило, не входят в группу Si (см. табл. 1), поэтому необходимо при определении плотности руд учитывать их вещественный состав. С этой целью все рудные элементы подразделяются на три группы: группа легких рудных элементов (группы Al, Fe, Co), средних (группа Ag) и тяжелых (группы W, Pb и U).

Руды, содержащие легкие элементы, по свойствам взаимодействия с гамма-лучами ничем не отличаются от горных пород. К ним применима методика учета вещественного состава, изложенная выше для случая горных пород. Приступая к определению плотности руд легких элементов, следует оценить влияние содержания этих элементов на график ослабления гамма-лучей. Если это влияние ощутимо и превышает точность построения самих графиков ослабления гамма-лучей, то его необходимо учесть, используя сведения о содержании полезного компонента в руде, например, по материалам геологического опробования. Незначительная разница между графиками ослабления гамма-лучей в различных группах легких элементов позволяет считать, что влияние вещественного состава в этом случае будет не существенным. Поэтому достаточно иметь приближенные сведения о составе руд.

Руды тяжелых элементов представляют собой смеси из компонентов, для которых не выполняется условие подобия спектров (10). Поэтому интерполяция между графиками ослабления гамма-лучей для этих руд должна выполняться по формуле (9). Разница между интерполяцией по спектру и по интегральной

Таблица 2

Группы элементов	Изверженные горные породы				Осадочные горные породы									
	Кислые	Щелочные	Основные	Ультраосновные	Глины	Песчаные и кремнистые породы	Известняки	Фосфориты	Латериты	Железные породы	Марганцевые породы	Каменная соль	Гипс и ангидрид	
Si	82	73	82	83	79	86	98	82	30	60	19	92	82	
Al	12	21	10	5	9	8	—	16	19	3	2	—	—	
Fe	5	4	7	10	5	3	—	—	25	34	1	—	—	
Co	—	—	—	—	—	—	—	—	3	—	68	—	—	
H ₂ O	—	—	—	—	5	1	—	—	20	—	10	6	18	
Итого	99	98	99	98	99	98	98	98	97	97	100	98	100	

интенсивности в этом случае составляет от 1—2 до 5—12% ρd и зависит от типа источника, детектора и величины поверхностной плотности.

Влияние тяжелых рудных элементов на результаты определения плотности максимально в случае использования источников с относительно малой энергией гамма-излучения. Оно существенно уменьшается с увеличением энергии гамма-лучей. Учитывая это обстоятельство и необходимость уменьшения влияния содержания рудных элементов на изменение графиков ослабления гамма-лучей, рекомендуетеся использовать для определения плотности руд тяжелых элементов источник Co^{60} и газоразрядные счетчики. В этом случае минимальное содержание тяжелых элементов, которое необходимо учитывать при определении плотности, составляет 2—5%. В прилож. 13—15 приведены графики ослабления гамма-лучей Co^{60} в смесях Si—W, Si—Pb, Si—U, полученные интерполяцией по спектру. С их помощью решаются практически все задачи, связанные с определением плотности руд тяжелых элементов.

Средние рудные элементы имеют спектры, близкие к спектрам в легких элементах, но не настолько, чтобы выполнялось условие (10). Разница между интерполяцией по спектру и по интегральной интенсивности для руд средних элементов все же имеется. Она составляет более 1% ρd в случае использования источ-

ника Cs^{137} ($E_0=0,66$ Мэв) и менее 0,5% ρd для источника Co^{60} ($E_0=1,25$ Мэв). Учитывая это, рекомендуется использовать для определения плотности руд средних элементов (группа Ag) источник Co^{60} , газоразрядные счетчики и приемы интерполяции по интегральной интенсивности.

Способы учета структуры руд при определении их плотности

На результаты определения плотности руд могут влиять плотностная неоднородность руд и неравномерное распределение и различие в размерах рудных минералов.

Из качественных теоретических заключений и экспериментальных данных [12] вытекает, что плотностная неоднородность незначительно влияет на ослабление гамма-излучения. Методом ослабления гамма-лучей определяется усредненная плотность.

Неравномерное распределение рудных минералов существенно не влияет на ослабление гамма-лучей в случае легких и средних элементов, но имеет значение при наличии тяжелых элементов. В общем случае эффект ослабления гамма-излучения будет различным, если при одном и том же содержании тяжелого элемента изменять характер распределения и размеры рудных минералов.

Наибольшее влияние неравномерного распределения рудных минералов наблюдается при их нахождении в непосредственной близости от источника или детектора. Так, например, графики ослабления гамма-излучения источников Co^{60} и Ra^{226} в искусственной смеси, содержащей 40% свинца и 60% железа, при регистрации излучения газоразрядным счетчиком изменялись на 4—7% ρd в зависимости от размещения железа и свинца. При размещении всей массы свинца у источника гамма-лучей, а железа — у детектора график ослабления гамма-лучей сдвигался по отношению к графику для равномерной смеси на 2,0—3,5% ρd в сторону больших значений ρd . При обратном размещении (свинец у детектора, а железо у источника) график смещался на такую же величину в сторону меньших значений ρd .

Симметричное смещение графика ослабления гамма-лучей при перемене места источника и детектора позволяет ввести простой прием, значительно ослабляющий влияние структуры и текстуры руд на результаты определения их плотности. Для этого достаточно измерить ослабленное излучение дважды, меняя местами источник и детектор, а затем усреднить логарифмы интенсивности ослабленного излучения или вычисленные значения плотности. Этот прием во многих случаях позволяет уменьшить или исключить влияние неравномерного распределения рудных минералов.

При определении плотности горных пород и руд легких и средних элементов повторные замеры в шпурах с переменной местами источника и детектора не обязательны, хотя их можно также практиковать для увеличения точности измерений.

Глава III

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И РУД ПО МЕТОДУ ОСЛАБЛЕНИЯ ГАММА-ЛУЧЕЙ В ШИРОКОМ ПУЧКЕ

Аппаратура, источники гамма-лучей и вспомогательное оборудование

При определениях плотности интенсивность гамма-излучения измеряется с помощью серийных радиометров с газоразрядными (типа МС и СТС) или сцинтилляционными (NaI (Tl)) счетчиками.

Газоразрядные счетчики являются весьма простыми, дешевыми и высокочувствительными приборами, но обладают низкой эффективностью регистрации излучения, не превышающей 1—2%.

На рис. 3 показаны кривые зависимости эффективности регистрации гамма-излучения от энергии для счетчиков типа МС и СТС [5]. В области энергий, где преобладает эффект Комптона, эффективность регистрации излучения линейно возрастает с возрастанием энергии, а в области малых энергий наблюдается минимум эффективности.

Сцинтилляционные счетчики по сравнению с газоразрядными счетчиками обладают малым разрешающим временем, высокой эффективностью регистрации излучения, достигающей 100%, а также способны работать при больших скоростях счета и измерять энергию излучения.

В радиометрии обычно используются активированные щелочногаллоидные кристаллы NaI (Tl) , обладающие высокой плотностью и атомным номером. При определениях плотности кристалл экранируется, что позволяет исключить регистрацию мягкого рассеянного излучения и тем самым свести до минимума влияние вещественного состава на результаты определения плотности. Как следует из рис. 4 [6], в области малых энергий эффективность экранированного кристалла значительно меньше, чем

неэкранированного, но в то же время она существенно выше эффективности газоразрядного счетчика.

Радиометры с газоразрядными счетчиками гораздо проще и дешевле, чем аппаратура со сцинтилляционными счетчиками.

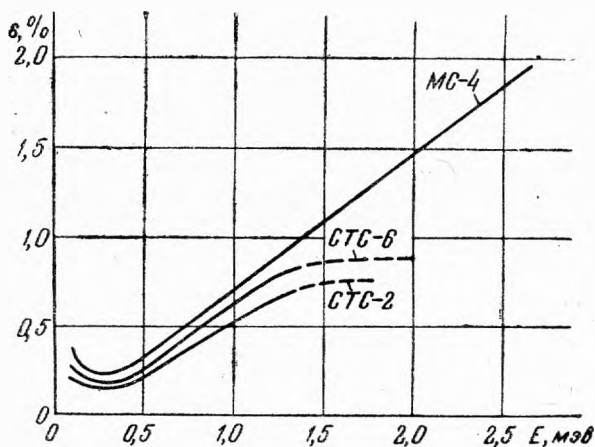


Рис. 3. Зависимость эффективности газоразрядных счетчиков различных типов от энергии гамма-лучей

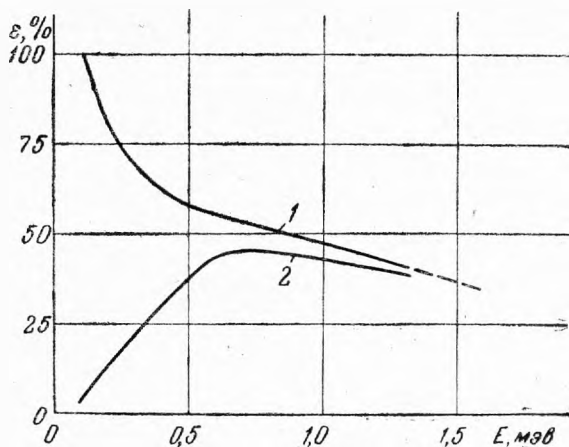


Рис. 4. Зависимость эффективности сцинтилляционного счетчика NaI от энергии гамма-лучей
1 — счетчик не экранирован; 2 — счетчик экранирован 2 мм свинца

Кроме того, для газоразрядного счетчика требования, предъявляемые к стабильности источника питания, менее жесткие, чем для сцинтилляционного.

При выборе того или иного типа радиометра необходимо учитывать как соответствие его технических данных условиям определения плотности, так и надежность и простоту в эксплуатации. Особое внимание нужно обращать на стабильность работы радиометра. Желательно, чтобы радиометр имел достаточно широкий диапазон измерений — от первых десятков до нескольких тысяч микрорентген в час. Этим требованиям удовлетворяют радиометры ПГР, РПР-1, ПРКС [22]. Для определения плотности в радиометре ПГР необходимо заменить головку

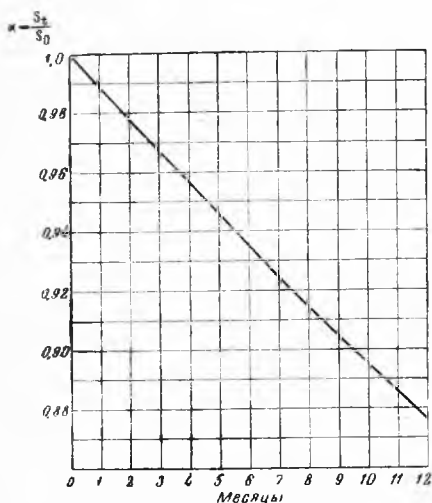


Рис. 5. График поправок на распад источника Co^{60}

1,25 Мэв. Одно милликюри Co^{60} по гамма-лучам эквивалентно 1,57 мг Ra^{226} .

Поскольку Co^{60} имеет сравнительно небольшой период полураспада, необходимо учитывать изменение активности источника Co^{60} во времени. На рис. 5 приведен график для определения поправок на распад Co^{60} . Активность источника в момент наблюдений определяется следующим способом. Вначале определяется время t , прошедшее с момента последнего определения активности изотопа до момента наблюдений. Если это время меньше года, то по графику находится величина поправки K , на которую нужно умножить величину активности источника S_0 в начальный момент времени t_0 . Если это время больше года, то вначале определяют поправку для неполного года, как указано выше. Далее величину начальной активности умножают на K и затем дополнительно на 0,876 столько раз, сколько полных лет прошло с начального момента. Например, начальная активность источника $S_0 = 1,05$ мкюри. Какова будет активность через 2 года 5 месяцев? Поправка для 5 месяцев равна 0,945, следовательно,

гамма-датчика на гильзу с одним счетчиком, не внося никаких изменений в схему прибора.

При определениях плотности горных пород и руд в качестве источников гамма-излучения используются широко распространенные радиоактивные изотопы: Co^{60} , Cs^{137} и Ra^{226} .

Радиоактивный изотоп Co^{60} имеет период полураспада $T = 5,24$ года. Его спектр состоит из двух энергетических линий в 1,17 и 1,33 Мэв. Выход гамма-квантов каждой линии составляет 100% на распад. Для расчетов можно принимать во внимание только одну линию со средней энергией

искомая активность равна: $S_t = 1,05 \cdot 0,945 \cdot 0,876 \cdot 0,876 = 0,76$ мкюри.

Поправку в активность источника Co^{60} достаточно вносить один раз в месяц. Если кроме источника Co^{60} используются другие типы источников, то не реже одного раза в два месяца нужно сверять их гамма-активность, пользуясь рабочим радиометром.

Радиоактивный изотоп Cs^{137} имеет одну линию в гамма-спектре с энергией 0,662 Мэв при 92% выходе гамма-квантов на распад. Период полураспада Cs^{137} $T=29$ лет. Это долгоживущий изотоп, поэтому поправки на распад в активность источников Cs^{137} не вносятся. Одно милликюри Cs^{137} эквивалентно 0,38 мз Ra^{226} . Cs^{137} рекомендуется применять для изучения сравнительно слабопоглощающих сред (глины, пески, различные грунты).

Источник Ra^{226} представляет собой естественный радиоактивный изотоп. Он входит в семейство урана и в равновесии с короткоживущими продуктами распада обуславливает примерно 98% гамма-активности природной урановой руды. Спектр гамма-лучей источника Ra^{226} состоит из 13 основных линий с энергией от 0,2 до 2,5 Мэв.

Период полураспада Ra^{226} $T=1590$ лет, так что активность его можно считать постоянной. Гамма-постоянная Ra^{226} равна 8,4 р/ч (при фильтрации излучения 0,5 мм Pt), т. е. интенсивность гамма-излучения источника в 1 мз Ra^{226} на расстоянии 1 м в воздухе составляет 840 мкр/ч. В паспорте источника обычно указывается количество Ra^{226} в миллиграммах. Для вычисления интенсивности гамма-излучения на расстоянии 1 м от источника необходимо умножить количество миллиграммов Ra^{226} на 840.

Источник Ra^{226} является достаточно удобным и широко применяется при определении плотности.

Для определения плотности достаточно иметь источники с содержанием радиоактивного вещества около 1—2 мз экв Ra . Такое количество обеспечивает достаточную интенсивность излучения и сравнительно безопасно в обращении. Для хранения источников необходимо иметь свинцовый контейнер. Сведения по технике безопасности при работах по определению плотности гамма-методом приводятся в прилож. 4. Общие правила и требования по технике безопасности при работе с радиоактивными веществами подробно изложены во многих работах [4, 8, 14, 15 и др.].

Для определения плотности в горных породах и рудах проходят на глубину до 1,5 м параллельные шпурь, диаметр которых должен быть равен диаметру датчика радиометра; в среднем он равен 40 мм. В рыхлых горных породах шпурь проходится с помощью ломика или вибратора, а в скальных породах — с помощью перфораторного горнопроходческого бура. В сыпучих породах шпурь приходится обсаживать тонкими жестяными трубками. В этом случае необходимо учитывать дополнительное

поглощение гамма-излучения в трубах, способы учета которого будут рассмотрены ниже.

Для проходки параллельных шпуров применяют направляющую рамку, конструкция которой показана на рис. 6. Рамка состоит из двух параллельных плотно связанных труб, одна из которых вставляется в уже пробуренный шпур, а вторая предназначена для направления бура при бурении второго шпура. Для проверки параллельности шпуров необходимо иметь два круглых деревянных шаблона длиной до 1,7 м и координатное устройство (см. рис. 11). Диаметр шаблонов выбирается с таким расчетом, чтобы шаблон плотно входил в шпур до забоя. На конце одного шаблона имеется приспособление, позволяющее закреплять ампулу с радиоактивным веществом. Конструкция такого приспособления зависит от формы ампулы.

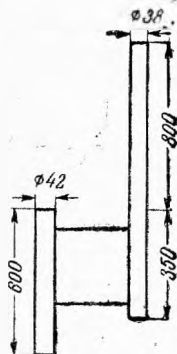


Рис. 6. Направляющая рамка для проходки параллельных шпуров (размеры даны в мм)

При проведении наблюдений необходимо также иметь металлическую линейку длиной 50—70 см, полевые журналы и другие письменные принадлежности.

Подготовка к полевым работам

Перед началом полевых работ необходимо предварительно проградировать радиометр и расставить метки глубин.

Градировкой устанавливается зависимость между показаниями радиометра и интенсивностью излучения точечного источника, размещаемого на различных расстояниях от датчика.

Методика и техника градировок подробно описаны в инструкциях по эксплуатации радиометров, прилагаемых к приборам, а также в различных руководствах по радиометрии [4, 14].

Для повышения точности определения плотности и исключения ошибок, связанных с неточностью определения величины активности используемых источников излучения, необходимо градировку и полевые наблюдения проводить с помощью одного и того же препарата. Если по тем или иным причинам приходится пользоваться несколькими источниками излучений, то предварительно необходимо сравнить их содержания путем измерения интенсивности излучения с помощью рабочего радиометра. Если для определения плотности используются источники различных типов, то во всех случаях необходимо вводить поправку на распад Co^{60} . Если же применяются только источники Co^{60} , то поправку на распад можно не вводить, поскольку изменение их активности автоматически учитывается при градировке радиометра. Для определения плотности допускается применение источников с неизвестным содержанием радиоактивного

вещества. В этом случае для градуировки и полевых наблюдений обязательно используется один и тот же источник излучения.

На гильзе радиометра, соединительном шланге и шаблонах через 10 см устанавливаются метки. За начало отсчета принимается середина детектора и середина ампулы с источником. Длина размеченной части определяется глубиной шпура. Обычно метки делаются из изоляционной ленты и закрепляются шпагатом. Для записей наблюдений готовятся полевые журналы, форма которых показана в прилож. 2.

Методика и техника полевых работ

Полевые наблюдения выполняются в нескольких (не менее двух) параллельных шпурах с интервалом по глубине через 10 см. Для того, чтобы исключить краевой эффект, первая точка наблюдений выбирается на расстоянии не менее 20 см от устья

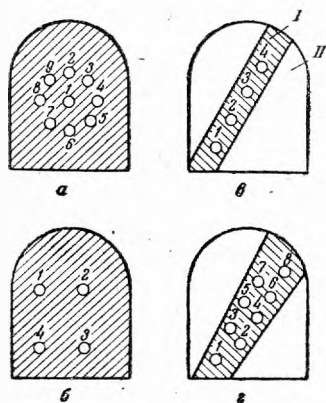


Рис. 7. Различные схемы расположения шпуров в плане

а — с центральным шпуром;
б — квадратный пакет; в — цепочка;
г — двойная цепочка.
I — руда; II — порода

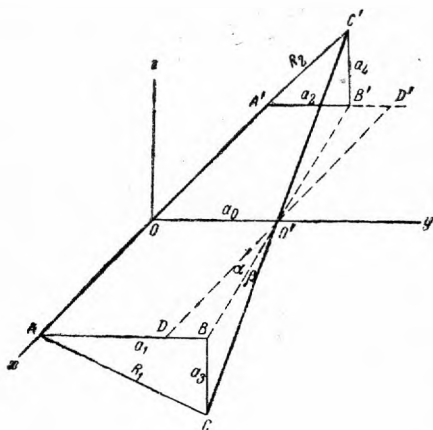


Рис. 8. Геометрия непараллельных шпуров

шпура. Во время наблюдений детектор и источник излучения устанавливаются строго по оси шпуров.

В зависимости от размеров рудных тел и горнопроходческих условий применяются различные варианты размещения шпуров (рис. 7). При больших размерах рудных тел и легкобуриемых породах применяется вариант а. В этом случае источник излучения помещается в центральном шпуре, а детектор — в шпурах, расположенных по периферии, и наоборот. При ограничен-

ных размерах рудных тел применяются варианты *в* и *г*, что позволяет исключить влияние их границ. В этих случаях детектор и источник излучения помещаются в смежных парах шпуров — 1—2; 2—3; 3—4; и т. д. или 1—2; 3—4; 5—6 и т. д. Когда необходимо произвести большое число измерений в труднобуримых породах, применяется вариант *б*. В последнем случае детектор и источник излучения размещаются во всевозможных сочетаниях шпуров по два; например, при 4 шпурах число сочетаний будет равно 6, а при перемене мест детектора и источника их будет 12.

В связи с рассеянием первичного излучения источника каждое измерение в паре шпуров характеризует плотность горных пород не только между шпурами, но и на некотором расстоянии от них, примерно равном 20—25 г·см⁻². Это обстоятельство следует учитывать при размещении шпуров по схемам *а*, *в* и *г*.

При любом способе бурения практически невозможно получить строго параллельные шпуры. Это обстоятельство приводит к ошибкам в определении плотности, которые в случае близко-расположенных шпуров могут достигать 10% и более. Для вывода формул, позволяющих рассчитать величину поправок за непараллельность шпуров, рассмотрим чертеж на рис. 8.

Плоскость *yz* совпадает с поверхностью горных пород, а прямая *OA'* — с осью одного из шпуров. Ось второго шпура *O'C'* составляет с направлением *O'D'*, параллельным оси первого шпура, в плоскости *xy* угол α и в плоскости *BCO'* угол β . Необходимо по измерениям в плоскости *ABC*, параллельной плоскости *yz* и расположенной от нее на расстоянии $b = OA$, вычислить расстояние R_2 между центрами шпуров в плоскости *A'B'C'*, также параллельной плоскости *yz* и расположенной от нее на расстоянии $h_0 = OA'$.

Расстояние R_2 и его проекция a_2 на плоскость *xy* связаны следующим уравнением:

$$R_2 = (a_2^2 + a_4^2)^{1/2}.$$

Принимая во внимание, что

$$a_4 = h_1 \cdot \sin \beta,$$

получаем

$$R_2 = (a_2^2 + h_1^2 \cdot \sin^2 \beta)^{1/2}, \quad (13)$$

где $h_1 = O'C'$.

Разлагая (13) в ряд Маклорена и ограничиваясь первыми двумя членами разложения, получим приближенное выражение:

$$R_2 = a_2 + \frac{\gamma}{a_2}, \quad (14)$$

где $\gamma = \frac{h_1^2 \sin^2 \beta}{2}$.

При $\gamma \leq \frac{a_2^2}{4}$ формула (14) позволяет вычислить значение R_2 с погрешностью менее 1,0%.

Из простых геометрических соотношений находим

$$a_2 = a_0 + (a_0 - a_1) \frac{h_1}{b}, \quad (15)$$

что позволяет по измеренным значениям a_0 , a_1 , a_3 и b вычислить R_2 для любой глубины h_1 .

Для вычисления R_2 используются номограммы, изображенные на рис. 9 и 10. С помощью первой номограммы по измеренным значениям a_3 и b (рекомендуется b принимать равным 70 см) определяется угол β . С помощью второй номограммы по найденной величине угла β определяется величина γ . Далее по формуле (15) вычисляется значение a_2 и по формуле (14) R_2 .

Следует отметить, что шпур OA' может быть и не перпендикулярен к поверхности горных пород. В этом случае плоскость yz не будет совпадать с поверхностью горных пород, что не существенно, поскольку можно все расстояния измерять от плоскости yz , а не от поверхности горных пород.

При измерении расстояний a_0 , a_1 и a_3 рекомендуется использовать специальное координатное устройство, изображенное на рис. 11. Координатная плоскость b с вертикальными стойками-шкалами 3 и $3'$ свободно вращается на подшипниках 5 вокруг вставленного в шпур шаблона 1 . Способ измерения всех необходимых величин виден из рисунка и не требует дополнительных пояснений.

Как показали вычисления, угол α необходимо учитывать, начиная с долей градуса, а угол β с 2° при условии, что при этом угол α также больше 2° . Из практики работ по определению плотности гамма-методом известно, что при использовании направляющей рамки углы α и β не превосходят $1,0-1,5^\circ$. В последнем случае можно считать, что шпуров лежат в одной плоскости, а R_2 вычисляется по формуле:

$$R_2 = a_0 + (a_0 - a_1) \frac{h_0}{b}. \quad (16)$$

Однако и в случае использования направляющей рамки следует проверять смещение шпуров в плоскости xz и учитывать его, если углы α и β превысят 2° .

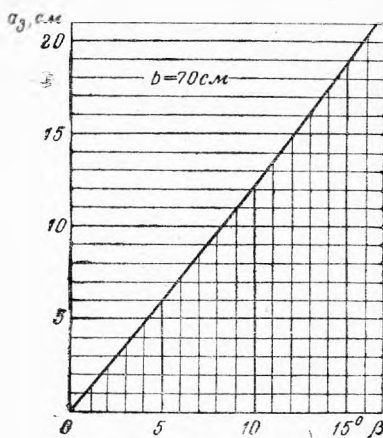


Рис. 9. Номограмма для вычисления угла β по расстоянию a_3

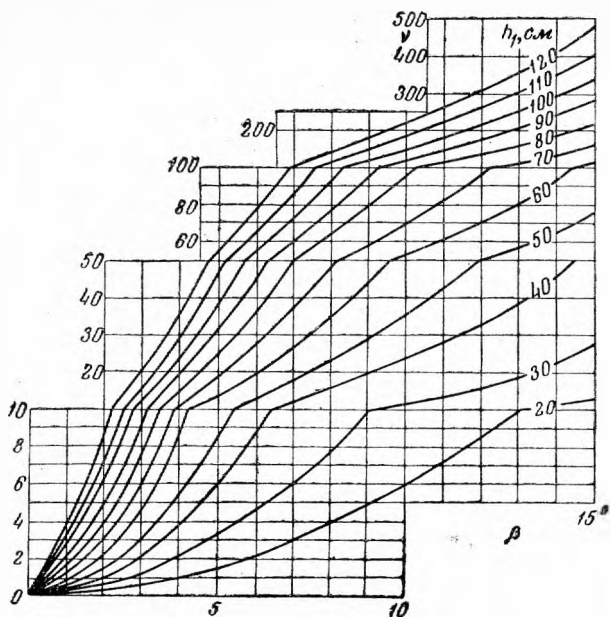


Рис. 10. Номограмма для вычисления γ по известным β и h

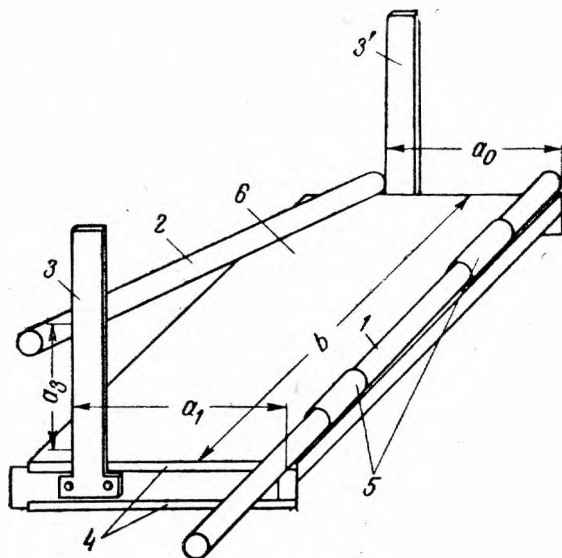


Рис. 11. Координатное устройство для измерения перегиба шпуров

1 и 2 — шаблоны; 3 и 3' — вертикальные оси шкалы; 4 — направляющие пазы для движения шкалы 3; 5 — подшпильники для вращения; 6 — координатная плоскость

Расстояния по оси шпуров h_0 и h_1 неодинаковы. Связь между ними устанавливается из условия, что R_2 лежит в плоскости $A'B'C'$ (см. рис. 8):

$$h_1 = \frac{h_0}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}.$$

Если углы α и β меньше 10° , то можно не учитывать разницу между h_0 и h_1 , т. е. можно погружать источник и детектор в оба шпура на одну и ту же глубину. При больших углах α и β влияние смещения по оси шпуров становится заметным и его необходимо учитывать.

При выборе расстояния между шпурами необходимо учитывать два обстоятельства. Во-первых, желательно максимально увеличить расстояние d для того, чтобы характеризовать возможно большой объем среды. Во-вторых, это расстояние нужно выбирать с таким расчетом, чтобы можно было уверенно измерять ослабленную интенсивность излучения источника. В большинстве случаев наиболее благоприятные условия достигаются при толщине поглощающего слоя $50-100 \text{ г/см}^2$, откуда оптимальная толщина поглощающего слоя d в линейных единицах и расстояние R_2 будут различны для сред разной плотности. Ориентировочные значения оптимального расстояния R_2 между шпурами в зависимости от плотности указаны в табл. 3 (данные в них рассчитаны для шпуров диаметром 40 мм).

Таблица 3

Величина плотности, г/см^3	Пределы оптимальных расстояний между центрами шпуров, см
1,5—2,0	35—55
2,0—3,0	30—40
3,0—4,0	22—30
4,0—5,0	19—25

Толщина поглощающего слоя d отличается от расстояния на величину диаметра шпура D :

$$d = R_2 - D. \quad (17)$$

Эта формула используется в тех случаях, когда шпур хорошо очищен от буровой муки и не происходит уплотнения его стенок. Такие условия наблюдаются, например, при бурении шпуров перфораторным буром в скальных породах или при бурении колонковым снарядом в рыхлых породах.

При проходке шпуров в рыхлых породах ломом или вибро-буром происходит уплотнение стенок. В таких случаях для опре-

деления естественной плотности пород необходимо принимать за толщину поглощающего слоя расстояние между центрами шпуров:

$$d = R_2. \quad (18)$$

При определениях плотности интенсивность излучения в шпурах измеряется дважды — первый раз без источника, второй раз при наличии источника в одном из шпуров. В результате первого измерения определяется интенсивность гамма-излучения горных пород I_ϕ . В результате второго измерения определяется суммарная интенсивность I_c , складывающаяся из ослабленного излучения источника и естественного излучения пород. Ослабленная интенсивность источника вычисляется по формуле:

$$I = I_c - I_\phi. \quad (19)$$

Собственное излучение пород и руд может затруднить определение плотности, если величина I_ϕ превысит 50% от I_c . Для уменьшения влияния собственного излучения пород и руд уменьшают расстояние между шпурами R_2 или увеличивают мощность источника излучения.

Полевые наблюдения проводятся в такой последовательности:

1. Намечаются точки для проходки шпуров.
2. Производится нумерация шпуров и составляется схема их расположения.
3. С помощью координатного устройства (см. рис. 11) измеряются расстояния a_0 , a_1 и a_3 .
4. Производится измерение интенсивности собственного излучения пород и руд во всех шпурах с интервалами через 10 см. Глубина погружения детектора определяется по меткам относительно плоскости zy . Во время измерений источник гамма-излучения помещается в контейнер и удаляется от места наблюдения на расстояние в несколько метров.
5. Производится измерение суммарной интенсивности излучения I_c в каждой паре шпуров при одинаковой глубине погружения источника и детектора. Интервалы между наблюдениями должны равняться 10 см. При определении плотности руд тяжелых элементов для ослабления влияния структуры необходимо производить два измерения на каждой глубине погружения детектора и источника, меняя их местами в шпурах. Во всех других случаях дублирование не обязательно, хотя его можно практиковать в целях повышения точности исследований.
6. По окончании всех работ производится повторное измерение расстояний a_0 , a_1 , a_3 .

Результаты всех измерений заносятся в полевой журнал, форма которого приведена в прилож. 2.

Обработка результатов полевых наблюдений

Предварительная обработка результатов полевых наблюдений выполняется в следующей последовательности:

1) осредняются результаты измерения расстояний a_0 , a_1 и a_3 , вычисляются расстояния между центрами шпуров R_2 ;

2) по формулам (17) или (18) вычисляется толщина поглощающего слоя d ;

3) с помощью градуировочного графика показания прибора в делениях шкалы микроамперметра переводятся в мкр/ч ;

4) по формуле (19) вычисляется величина ослабленной интенсивности излучения источника.

Вычисления можно упростить, если величина углов α и β не превышает 2° , а глубина шпуров 1 м. В этом случае для каждого шпура можно произвести усреднение измеренных на различной глубине интенсивностей излучения I_ϕ и I_c , а также расстояний R_2 . Имея это в виду, необходимо в каждом шпуре размещать нечетное количество точек наблюдений, а базисное расстояние b брать равным глубине средней точки наблюдений. В этом случае среднее расстояние между центрами шпуров вычисляется по формуле

$$R_2 = 2a_0 - a_1. \quad (20)$$

Пример упрощенных вычислений рассматривается в прилож. 2.

Для вычисления плотности используются графики ослабления гамма-излучения точечного источника в моноэлементных средах, приводимые в прилож. 7—12. Методика учета вещественного состава пород и руд и правила выбора соответствующих графиков ослабления подробно изложены в главе II. Все дальнейшие вычисления выполняются в следующем порядке.

1. Вычисляется интенсивность излучения источника в воздухе. Если размеры детектора в 3—4 раза меньше расстояния между источником и детектором, то интенсивность излучения в воздухе вычисляется по формуле:

$$A = \frac{S}{R^2}, \quad (21)$$

где S — интенсивность источника на единице расстояния;

R — расстояние между центрами источника и детектора.

Если длина детектора соизмерима с расстоянием между источником и детектором, то необходимо учесть размеры детектора, вычисляя A по формуле:

$$A = \frac{S}{R \cdot l} \arctg \frac{l}{R}, \quad (22)$$

где l — половина длины счетчика.

Для облегчения вычислений удобно пользоваться графиками $A=f(R)$, вычисленными по формуле (22).

2. Вычисляется величина отношения $\frac{I}{A}$ и ее десятичный логарифм $\lg \frac{I}{A}$. По найденному значению $\lg \frac{I}{A}$ и графику ослабления излучения определяется толщина поглощающего слоя ρd и искомая величина плотности ρ . Десятичные логарифмы можно определять с помощью таблицы или логарифмической линейки. При обработке рядовых наблюдений с достаточной для практики точностью $\lg \frac{I}{A}$ можно находить по специальному графику (см. прилож. 16).

Ниже рассматривается несколько конкретных примеров определения плотности пород и руд.

1. Определяется плотность медистых песчаников. Содержание меди в руде не более 1—2%, Al_2O_3 примерно 5—10% и Fe не более 4%. Основная масса руды (75—85%) представлена SiO_2 . Для определения плотности используется источник Co^{60} и газоразрядный счетчик типа МС, экранированный 5 мм железа. Толщина поглощающего слоя $d=40,2$ см, $\lg \frac{I}{A} = -1,56$.

В прилож. 7 находим графики ослабления для источника Co^{60} и газоразрядных счетчиков (Гейгера-Мюллера)*. Основным графиком в данном случае будет график группы Si. Примесями, влияние которых необходимо учесть, являются элементы группы алюминия и железа: Al, Fe и Cu. Сравнение различных графиков ослабления излучения показывает, что графики для группы Al и Fe находятся выше графика для Si. Разница между ними по оси ρd составляет в среднем 4%, что позволяет проводить интерполяцию не по логарифму интенсивности, а по ρd . Суммарное содержание элементов группы Al около 7% и группы Fe около 6%. Следовательно, как показывают расчеты по формуле (12), необходимо сместить график Si в сторону графика Al на 0,28% ρd и в сторону графика Fe на 0,24%. Общее смещение графика Si в сторону больших значений ρd составляет 0,52%. Таким смещением можно пренебречь и пользоваться основным графиком. В нашем примере при $\lg \frac{I}{A} = -1,56$ $\rho d = 91,0$ г/см² и $\rho = \frac{91,0}{40,2} = 2,26$ г/см³.

2. Определяется плотность рыхлых отложений, состоящих в основном из SiO_2 (60—70%), Al_2O_3 (10—15%), Fe_2O_3 и FeO (порядка 5—6%) и имеющих высокую влажность (20—25%). Используется источник Cs^{137} и счетчик Г-М типа МС, экраниро-

* В дальнейшем газоразрядный счетчик Гейгера-Мюллера обозначается Г-М.

ванный 5 мм железа. Данные для расчета: $\lg \frac{I}{A} = -1,79$, $d = 48,4$ см.

В прилож. 9 находим графики для Cs^{137} и счетчика Г-М. При $\lg \frac{I}{A} = -1,79$ разница между графиком для Si и графиками для Al, Fe и H_2O составит соответственно 2,5, 4,7 и 7,8% ρd . причем график Al расположен выше, а графики Fe и H_2O ниже графика Si. Учитывая примерные содержания Al, Fe и влаги, получаем следующие значения поправок к основному графику: +0,15; -0,14 и -1,72% ρd . Суммарная величина поправки равна -1,7%. На эту величину необходимо сместить основной график в сторону меньших значений ρd . Используя исходные данные, находим по смещенному графику значение $\rho d = 82,5$ г/см² и $\rho = 1,70$ г/см³ (вместо $\rho d = 84,0$ г/см² и $\rho = 1,73$ г/см³ без введения поправки).

3. Определяется плотность вольфрамовой руды, находящейся в породах кислого состава. По данным опробования содержание W в руде 12%. Для определений использовался источник Co^{60} и счетчик Г-М типа СТС, экранированный 5 мм железа. Данные для расчета: $\lg \frac{I}{A} = -1,22$, $d = 25,2$ см. Руда примерно содержит: 60—70% SiO_2 , 12—16% Al_2O_3 , 3—6% Na_2O , 3—5% Fe_2O_3 и FeO. Смещение основного графика за счет примесей элементов группы Al и Fe составляет менее 0,5% ρd и поэтому может не учитываться. Для определения плотности необходимо воспользоваться графиками ослабления для смеси Si—W (см. прилож. 13). По величине $\lg \frac{I}{A}$, равной -1,22, и при содержании 12% W находим $\rho d = 71,5$ г/см² и затем $\rho = 2,84$ г/см³. Если не учитывать содержание вольфрама, то получим завышенное значение плотности, равное 2,92 г/см³.

При определениях плотности горных пород, валовый состав которых мало изменяется, можно пользоваться одним и тем же графиком ослабления излучения для обработки сравнительно большого количества результатов наблюдений. В этом случае удобно применять специальные номограммы, рассчитанные для шпуров определенного диаметра. Способ построения таких номограмм подробно изложен в прилож. 1, в конце которого приводится разъяснение о введении поправок за изменение мощности источника излучения, если последняя не равна мощности, для которой рассчитана номограмма. Применение номограмм позволяет по величине I и d непосредственно вычислять плотность пород, что выполняется в процессе предварительной обработки результатов наблюдений.

Случайные ошибки (ошибки воспроизводимости) выявляются путем повторных определений плотности в одних и тех же точках с соблюдением прежних условий. По результатам пар-

ных определений вычисляется среднеквадратическая относительная ошибка:

$$M = \frac{\sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{2n}}}{\frac{\sum X}{n}}, \quad (23)$$

где $\Delta = X - Y$;

X — основное определение;

Y — повторное;

n — число парных определений.

Как показывает опыт производственных работ, при использовании радиометров со счетчиками Г-М в неблагоприятных условиях (высокий гамма-фон пород) среднеквадратическая относительная ошибка в среднем составляет $\pm 3\%$, а в благоприятных условиях $\pm 2\%$. В настоящее время этими цифрами можно руководствоваться при оценке качества работ. Грубыми ошибками следует считать расхождения между основным и повторным определением, превышающие $2M$. Такие определения являются браком и подлежат переделке.

Внутренний контроль достаточно выполнять в объеме 20% от общего числа выполненных определений; он должен составлять не менее $25-30$ определений. При незначительных объемах работ повторные определения должны выполняться в каждой точке наблюдений.

Случайные ошибки при определении плотности складываются, в основном, из ошибок измерения расстояний a_0, a_1, a_2 и интенсивности излучения I_f и I_c . Анализ фактических материалов показывает, что ошибка в определении расстояний при двухкратных измерениях составляют всего $\pm 0,6\%$, а ошибки в определении интенсивности излучений в зависимости от условий колеблются от 4 до 7% . Таким образом, точность определения плотности, в основном, зависит от точности измерения интенсивности излучения. Поэтому при измерении интенсивности излучения необходимо тщательно выполнять градуировку радиометра и систематически контролировать стабильность работы аппаратуры.

Контроль за работой аппаратуры осуществляется систематически путем сравнения градуировочных графиков и путем контрольных измерений интенсивности гамма-излучения проверочного эталона или источника гамма-излучения, используемого для определения плотности.

Контрольные измерения интенсивности излучения проверочного эталона проводятся ежедневно в начале и конце рабочего дня. Результаты контрольных измерений не должны отличаться больше, чем на $\pm 5\%$ от средней величины за несколько дней. Расхождения между утренним и вечерним измерениями

не должны превышать 5—7%. В противном случае проверяется исправность аппаратуры, а полевые измерения бракуются.

Градуировочные графики радиометров должны отличаться друг от друга не более чем на 3%. Количество повторных градуировок зависит от стабильности работы радиометра и может приниматься от 3—4 до 5—7 раз в месяц.

При анализе случайных ошибок целесообразно наряду с анализом ошибок определения плотности отдельно оценивать ошибки определения расстояний и интенсивности излучения. Это помогает выявлять грубые ошибки.

Значения плотности горных пород и руд обычно получают путем осреднения результатов определения для отдельных участков, для определенных сортов руд или в целом для месторождения. Полученные таким образом средние значения плотности могут использоваться при подсчете запасов или для других не менее важных целей. В этом случае особое значение имеют систематические ошибки определения плотности.

Графики, используемые для определения плотности, построены с точностью до 1% для легких элементов и 2% для тяжелых. Следовательно, за счет неточностей графиков систематическая ошибка в определении плотности может составить 1,0—1,5%, что можно принять за предельно допустимую величину систематической ошибки. Анализ фактических материалов показывает, что эта ошибка, как правило, составляет доли процента и в крайних случаях не превышает 1%.

Систематические ошибки могут также возникать за счет уплотнения стенок шпуров или за счет постоянного смещения детектора или источника относительно оси шпура. Эти систематические ошибки сравнительно легко обнаруживаются и легко устраняются.

Установление систематических ошибок производится путем сравнения полученных результатов с результатами определения плотности другими методами (внешний контроль). Для этой цели можно использовать метод выемки целиков, валовый метод и метод определения плотности парафинированных образцов [16, 21]. Метод выемки целиков и валовый метод можно применять при определениях плотности как рыхлых, кавернозных, так и скалистых горных пород. Метод парафинированных образцов можно применять только при определении плотности твердых горных пород, не имеющих каверн и макротрещин. Для исключения случайных ошибок необходимо отбирать не менее 30—40 образцов и для сравнения пользоваться осредненными данными.

Для исключения систематических ошибок необходимо определение плотности пород и руд различными методами производить в пределах одних и тех же участков; например, целики, подлежащие валовому выему, должны быть тщательно изучены с помощью основного метода. Случайные ошибки на участках,

где проводятся сравнительные работы, устраняются путем двух-трех повторных наблюдений. При больших объемах целиков выбирается два-три участка в теле целика, где определяется плотность по ослаблению излучения.

Систематическая ошибка основного метода вычисляется по относительной разнице между средними значениями плотностей, полученными двумя различными методами. При сопоставлении должно быть не менее 20—30 определений, а при особо надежных результатах наблюдений обоими методами можно ограничиться 10—15 определениями. При незначительных объемах наблюдений внешний контроль не производится, поскольку незначительное число сравнений не позволяет с необходимой точностью найти систематическую ошибку.

Документация и отчетность

Результаты всех измерений записываются в полевой журнал по форме, указанной в прилож. 2. Кроме основных записей, в журнале необходимо зарисовывать схемы расположения шпуров, в которых определялась плотность, макроструктуру пород и руд, отмечать наиболее крупные трещины, зоны дробления и т. д. Все эти сведения необходимы для правильной интерпретации результатов определения плотности и позволяют исключать грубые ошибки. Полевая документация должна быть четкой и полной.

Обработка результатов наблюдений проводится в специальном журнале (см. прилож. 2), который заполняется по мере накопления материала. В журнале для обработки полевых наблюдений должны содержаться все необходимые сведения, позволяющие вычислять плотность.

Систематизация результатов определения плотности производится в сводном журнале (см. прилож. 2). Кроме результатов определения плотности, в этот журнал вносятся сведения о вещественном составе пород и руд, а также результаты повторных определений плотности и результаты определений плотности другими методами.

Отчет о проведенных работах должен состоять из краткой объяснительной записки и сводного журнала. В объяснительной записке кратко излагается методика и техника работ, условия, в которых производились измерения, способы интерпретации результатов и уровень случайных и систематических ошибок. Кроме того, в объяснительной записке дается краткая характеристика работы аппаратуры и приводятся сведения о методике определения плотности пород и руд другими методами.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПОСТРОЕНИЕ НОМОГРАММ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ

Для определения плотности может многократно использоваться один и тот же график ослабления гамма-излучения и сохраняться постоянный диаметр шпуров. В таких случаях для облегчения вычислений целесообразно построить номограмму (рисунок).

Рассмотрим построение номограммы на частном примере. Исходные данные: источник Co^{60} , $S=900$ мкр/ч, детектор-счетчик Г-М, экранированный 5 мм железа, диаметр шпуров $D=40$ мм ($d=(R-4)$ см), ожидаемый диапазон изменения плотности 2—3 г/см³, вещественный состав пород допускает использование графика группы Si.

Номограмма состоит из трех различных ориентированных семейств линий, соответствующих I , d и ρ . Построение номограммы начинается установлением ориентировочного диапазона изменения указанных величин. Диапазон изменения ρ задан условием: $\rho=2,0\text{—}3,0$ г/см³.

Исходя из оптимальной величины поверхностной плотности поглощающего слоя $\rho d=50\text{—}90$ г/см², определяются диапазоны изменения d и R :

$$d=17\text{—}45 \text{ см};$$

$$R=21\text{—}49 \text{ см}.$$

Для выбранного диапазона ρd с помощью соответствующего графика ослабления гамма-лучей (прилож. 7) находят:

$$-\lg \frac{I}{A} = 0,77 \div 1,54$$

и

$$\frac{I}{A} = 0,17 \div 0,03.$$

Используя пределы изменения R и величину активности источника S , по формуле (21) находим пределы изменения A :

$$A=21400 \div 3750 \text{ мкр/ч},$$

а затем диапазон изменения I :

$$I=3600 \div 110 \text{ мкр/ч}.$$

Крайним значениям d соответствуют не линии, а точки, поэтому при окончательном выборе пределов изменения I , ρ и d нужно несколько расширить пределы изменения ρ и соответственно их уменьшить для I и d . Для рассматриваемого случая пределы изменения I , ρ и d выбраны так, как показано на рисунке.

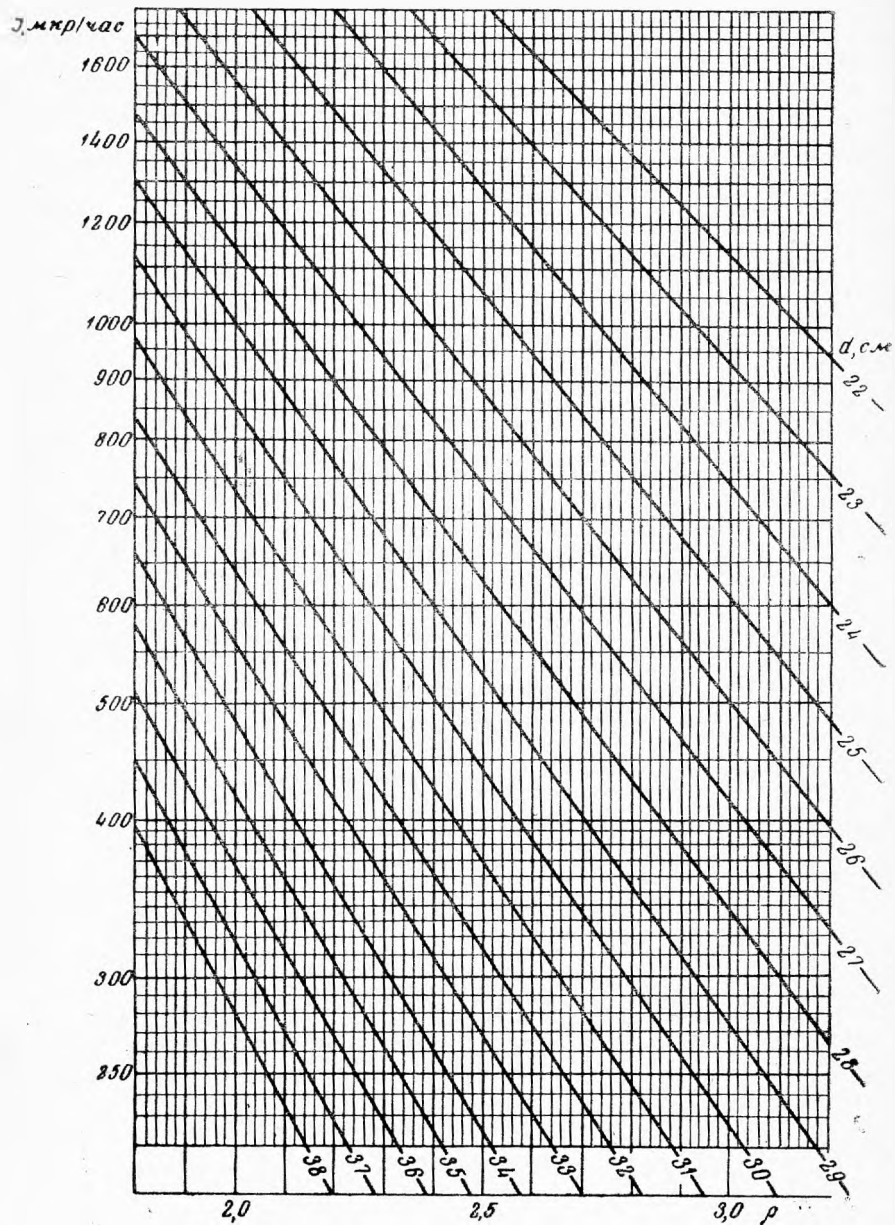


Рисунок. Номограмма для вычисления плотности

После выбора диапазонов на бланк номограммы наносятся шкалы и линии семейств I и ρ . Шкала I строится в логарифмическом масштабе, для ее построения удобно пользоваться логарифмической линейкой с модулем, равным 25 см.

Линии семейства d строятся по точкам, вычисление координат которых производится по схеме, приведенной в таблице. Если график ослабления гамма-лучей на выбранном участке ρd близок к прямой линии, то соответствующие линии семейства также будут прямыми и они легко строятся по трем точкам. При криволинейном графике для построения линий d необходимо вычислять большее количество точек.

d , см	R , см	ρ , г/см ³	ρd , г/см ²	$-\lg \frac{I}{A}$	$\frac{I}{A}$	A , мкр/ч	I , мкр/ч
22	26	3,0	66,0	1,070	0,0850	13 300	1130
		2,7	59,5	0,945	0,114		1515
		2,5	55,0	0,865	0,136		1820
		3,0	84,0	1,420	0,0382		335
28	32	2,5	70,0	1,150	0,710	8 750,1	622
		2,0	56,0	0,880	0,132		1150

Вычисления по приведенной схеме не требуют пояснений. Координаты соответствующей линии определяются значениями ρ и I .

Следует сказать, что номограмма легко изменяется при изменении интенсивности излучения источника S . Так, если номограмма построена для значения S_1 , а требуется ее перестроить для S_2 , то достаточно величины I_1 заменить на I_2 по соотношению:

$$I_2 = \frac{I_1}{S_1} S_2.$$

Это равносильно сдвигу шкалы I на соответствующую величину без ее деформации. Можно пользоваться старой номограммой, рассчитанной для S_1 , но при вычислении плотности зарегистрированную с источником S_2 интенсивность I_2 предварительно умножить на отношение $\frac{S_1}{S_2}$. Рассмотрим пример. Номограмма (см. рисунок) рассчитана для источника с $S_1=900$ мкр/ч. При полевых измерениях использовался источник $S_2=720$ мкр/ч. Для одного из шпуров $d=26,0$ см, $I_2=970$ мкр/ч. Воспользуемся для вычисления плотности номограммой, приведенной на рисунке. Для этого сначала введем поправку в интенсивность излучения:

$$I=970 \cdot \frac{720}{900} = 775 \text{ мкр/ч.}$$

По исправленному значению интенсивности (775 мкр/ч) и $d=26,0$ см, находим $\rho=2,61$ г/см³.

ФОРМЫ ДОКУМЕНТАЦИИ И ОТЧЕТНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ
ПЛОТНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И РУД ПО ОСЛАБЛЕНИЮ
ГАММА-ЛУЧЕЙ

Примерная форма журнала полевых наблюдений

Дата измерений _____

Счетчик _____

Место измерений _____

Источник _____

Прибор № _____

Активность источника _____

Гильза _____

$b =$ _____, $D =$ _____

О п е р а т о р

Номера шнуров	a_0 , см	a_1 , см	a_2 , см	Глубина точки h , см	I_Φ		I_c		Приме- чание
					диапа- зон	деление шкалы	диапа- зон	деление шкалы	
1—2	24,7	25,2	0,2	20	II	42	III	54	
	и	и	и	30	II	28	III	45	
	и	и	и	40	II	22	III	40	
	24,9	25,1	0,3	50	II	20	III	40	
				60	II	18	III	37	
1—3	24,8	24,0	0	20	II	34	III	47	
	и	и	и	30	II	30	III	47	
	и	и	и	40	II	30	III	44	
	25,4	24,2	0	50	II	32	III	42	
				60	II	32	III	49	

Примерная форма журнала обработки наблюдений

Дата измерений _____

Счетчик _____

Место измерений _____

Источник _____

Прибор № _____

Активность источника _____

Гильза _____

$b =$ _____ $D =$ _____

Дата градуировки _____

Оператор _____

Вычислитель _____

Номера шнуров	R , см	d , см	I_c		I_ϕ		$I = I_c - I_\phi$	А	$\frac{I}{A}$	$\lg \frac{I}{A}$	ρd , г/см ²	ρ , г/см ³
			мкр/ч	средн.	мкр/ч	средн.						
1—2	24,4	20,4	3150 2620 2350 2350 2160	2530	1120 800 620 570 510	740	1790	12 800	0,140	—0,85	55,0	2,70
1—3	25,3	21,3	2750 2750 2570 2450 2800	2670	970 850 850 910 910	880	1790	12 000	0,149	—0,83	54,0	2,54

Примерная форма сводного журнала

Пункт определения плотности	Характеристика породы или руды	Содержание полезных компо- нентов	Плотность, г/см ³			
			Основной метод		Контролир. метод	
			Основное определение	Повторное определение	Целики	Метод парафини- рования
Канавка 72, 12-й метр	Известняк CaO—50% CO ₂ —35%	—	2,55	2,50	—	2,54
Шахта № 1, квер- шлаг 7, 49-й метр сев. стенки	Фосфорит CaO—40% SiO ₂ —30%	P ₂ O ₅ —25%	2,88	2,90	2,90	—

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Примерный состав бригады для определения плотности по ослаблению гамма-лучей следующий:

бурильщик	— 0,3
оператор (техник)	— 1,0
вычислитель (техник)	— 0,3
инженер-интерпретатор	— 0,1.

Производительность бригады в смену составляет 6—8 определений в условиях подземных горных выработок и 10—12 определений на поверхности и в поверхностных горных выработках. Под одним определением понимается весь цикл полевых и камеральных работ по определению плотности на участке, где производится 20—25 измерений интенсивности в нескольких шпурах.

Стоимость одного определения на участке в условиях подземных горных выработок примерно в 50 раз меньше стоимости одного определения методом выемки целиков.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ПЛОТНОСТИ ГАММА-МЕТОДОМ

Гамма-лучи, проникая в ткани и органы человеческого тела, производят ионизацию атомов и молекул и тем самым оказывают вредное воздействие на организм. После снятия облучения нормальное состояние организма восстанавливается спустя некоторое время. Большие дозы облучения представляют для человека серьезную опасность. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами [15] устанавливают предельно допустимые уровни (ПДУ) облучения гамма-лучами, которые являются безопасными для организма. Необходимо строго соблюдать порядок работы, при котором дозы облучения не превышают ПДУ.

Помня о вредном воздействии гамма-лучей, не нужно, однако, его переоценивать. В гамма-методе определения плотности используются закрытые источники гамма-лучей, так что работающие с ними подвергаются только внешнему облучению. После удаления гамма-источника облучение организма прекращается, причем обращение с источником не приводит к радиоактивному загрязнению рук, одежды и организма в целом. При соблюдении некоторых предосторожностей, главной из которых является сохранение определенного расстояния между источником гамма-лучей и телом, работы с источниками гамма-лучей вполне безопасны.

Ниже в соответствии с Санитарными правилами [15] изложены ПДУ, способы расчета доз и меры по безопасному ведению работ с источниками гамма-лучей.

Единицы измерения. Расчет дозы и мощности дозы. ПДУ

Для характеристики ионизирующей способности гамма-излучения используется понятие «доза», которое выражает энергию гамма-излучения, поглощенную одним граммом вещества. В качестве единицы дозы служит рентген (p) и производные единицы: миллирентген ($1\text{ }mr=10^{-3}\text{ }p$) и микроцентген ($1\text{ }\mu cr=10^{-6}\text{ }p$). Мощность дозы равняется отношению дозы ко времени ее действия:

$$P = \frac{D}{t}, \quad (24)$$

где D — доза;
 t — время.

Единицами мощности дозы служат $p/ч$, $мр/ч$, $мкр/ч$ и другие (в радиометрии единицы мощности дозы используются также в качестве единицы интенсивности гамма-излучения).

Количество радиоактивного изотопа измеряется его активностью Q , равной числу распадов ядер в единицу времени. Единицей активности служит кюри и производные единицы: милликюри (*мкюри*) и микрокюри (*мккюри*). Кроме того, для измерения активности используется единица миллиграмм-эквивалент радия (*мг. экв радия*). Для связи количества радиоактивного изотопа Q в *мкюри* и количества M , выраженного в *мг. экв радия*, имеется соотношение:

$$M = Q \frac{K_{\gamma}}{8,4}, \quad (25)$$

где K_{γ} — гамма-постоянная изотопа в $\frac{p \cdot см^2}{ч \cdot мкюри}$ (справочная величина).

Величину M обычно называют гамма-эквивалентом изотопа. Гамма-постоянная Ra^{226} равна $8,4 \frac{p \cdot см^2}{г \cdot мкюри}$, так что *мг. экв радия* численно равен *мкюри* Ra^{226} .

Для расчетов дозы и мощности дозы на расстоянии R от точечного гамма-источника служат следующие формулы:

$$D = \frac{M \cdot 8,4 \cdot t}{R^2 \cdot 10^4} = \frac{Q K_{\gamma} \cdot t}{R^2 \cdot 10^4}; \quad (26)$$

$$P = \frac{M \cdot 8,4}{R^2 \cdot 10^4} = \frac{Q K_{\gamma}}{R^2 \cdot 10^4}, \quad (27)$$

где D — доза, p ;
 P — мощность дозы, $p/ч$;
 Q — активность, *мкюри*;
 M — гамма-эквивалент, *мг. экв радия*;
 t — время, ч;
 R — расстояние, м.

Санитарные правила устанавливают ПДУ как по дозе, так и по мощности дозы. Так как воздействие гамма-лучей на организм обладает свойством аккумулятивности, то ПДУ устанавливаются для разового облучения, для недели, года и всего времени работы человека с радиоактивными веществами.

ПДУ дозы облучения всего организма гамма-лучами с энергией до 3 Мэв (именно такие гамма-лучи используются в гамма-методе определения плотности) равен 0,1 p в течение недели или 5 p в год. Допускается однократная доза внешнего облучения в 3 p в любые 13 последовательных недель (квартал) при условии, что годовая доза не будет превышать 5 p . Суммарная доза D для человека, имеющего возраст N лет, не должна превышать:

$$D < 5 (N - 18) p.$$

Суммарная доза к 30 годам не должна превышать 60 p .

Для кистей рук установлена повышенная допустимая доза облучения, а именно — в 5 раз больше, чем для организма в целом (0,5 p в неделю, 25 p в год и т. д.).

Чтобы рассчитать ПДУ мощности дозы P_0 , нужно согласно формуле (24) разделить ПДУ дозы D_0 на время t работы с гамма-источником в течение времени, для которого установлен ПДУ. Например, $D_0 = 0,1 p$ в неделю; суммарное время работы с источником в течение недели составляет $t = 36 ч$; тогда ПДУ мощности дозы источника будет равен:

$$P_0 = \frac{0,1}{36} p/ч = 0,00278 p/ч = 2780 мкр/ч.$$

Зная активность или мощность источника гамма-излучений и задавая время работы с ним, можно, используя формулы (26), (27) и ПДУ, рассчитать допустимые расстояния между источником и телом. Иногда приходится решать с помощью указанных формул несколько иную задачу: по заданному расстоянию и активности источника определять допустимое время работы с ним. Приведем два простых примера.

Пример 1. Имеется точечный источник Co^{60} активностью 2,5 *мюри*. Необходимо определить расстояние, на котором доза в течение недели (36 рабочих часов) не превысит ПДУ. Гамма-постоянная Co^{60} равна 13,2. Используя формулу (26) и ПДУ дозы $D_0=0,1$ р, определяем безопасное расстояние:

$$R_0 = \sqrt{\frac{2,5 \cdot 13,2 \cdot 36}{0,1 \cdot 10^4}} = 1,1 \text{ м.}$$

Пример 2. При работе с точечным источником Cs^{137} активностью в 1,5 *мг·экв радия* расстояние между источником и телом равняется $R=0,5$ м. Необходимо подсчитать допустимое время работы с источником, исходя из ПДУ дозы в неделю $D_0=0,1$ р. Применяя формулу (26), находим допустимое время работы:

$$t_0 = \frac{0,1 \cdot 0,25 \cdot 10^4}{1,5 \cdot 8,4} = 20 \text{ ч.}$$

Если условия работы с гамма-излучателями таковы, что нельзя уменьшить облучение до ПДУ путем изменения расстояния между источником и телом, применяют экраны и различного рода защитные приспособления, уменьшающие интенсивность гамма-излучения. В целях защиты от гамма-лучей обычно используют такие материалы, как свинец, бетон, железо и ряд других.

Рекомендации по безопасному ведению работ при определениях плотности гамма-методом

При работе с закрытыми источниками активностью 1—2 *мг·экв радия* основной мерой предосторожности является соблюдение определенного расстояния между телом и источником. Санитарные правила запрещают прикасаться руками к источнику, если он не находится в защитном контейнере. Все операции с источником необходимо выполнять с помощью щипцов, захватов или каких-либо иных манипуляторов, обеспечивающих удаление источников от кисти руки на 10—15 см.

При работе с источниками нужно усвоить и выполнять следующее правило — не оставаться в непосредственной близости от источника больше времени, чем это необходимо для выполнения работ.

Для переноски источника гамма-лучей к месту работы и обратно, а также для переносок в процессе работы нужно иметь контейнер. Рекомендуется использовать контейнеры из железа или другого материала со свинцовыми стенками толщиной 15—20 мм. Такая защита обеспечивает примерно двукратное ослабление излучения источников Co^{60} , Cs^{137} и Ra^{226} . Контейнер должен иметь ручку, чтобы при переноске расстояния между источником и рукой было не менее 15—20 см.

В нерабочее время контейнер с источником нужно хранить либо в специальном хранилище, либо в помещении, где не ведутся другие работы. Во всех случаях люди должны находиться на таком расстоянии от источника, на котором гамма-излучение (с учетом поглощения в защите) не превышает 10 *мкр/ч*. Безопасное хранение источника максимальной активности (2 *мг·экв радия*) обеспечивается, если контейнер с источником удалить на расстояние 1 м (без дополнительной защиты). При защите в виде бетонной или кир-

пичной стены толщиной 20—30 см или в виде слоя земли (песка) толщиной 35—40 см безопасное расстояние составит 3—4 м. Если контейнер защищен кирпичной или бетонной стеной толщиной 60—70 см или слоем земли (песка) толщиной 80—100 см, то безопасная зона начинается непосредственно у защитного слоя.

В процессе подготовки аппаратуры и при полевых работах гамма-методом наибольшие дозы облучения имеют место в следующих операциях: градуировка радиометра; закрепление источника в шаблоне-держателе; перемещение источника из одного шпура в другой. Время, необходимое для указанных операций, составляет лишь небольшую часть общего рабочего времени. В процессе измерения непараллельности шпуров, при измерениях естественной гамма-активности и суммарной активности источник находится либо в шпуре (и в этом случае работающий защищен слоем горной породы), либо в контейнере на безопасном расстоянии от места работ (до 10 м).

В заключение оценим недельную дозу, которую можно получить при работе с источником в $2 \text{ мг} \cdot \text{экв} \text{ радия}$ в условиях определения плотности гамма-методом, а также укажем допустимое время работы с источником на минимальных расстояниях.

При выполнении наиболее радиационно опасных операций кисти рук находятся на расстоянии 10 см от источника и тело на расстоянии 40—50 см (закрепление источника в держателе и перемещение источника в процессе градуировки); время, необходимое на эти операции, составляет максимум 1 ч в неделю. Вторую группу составляют операции, в процессе которых тело находится на расстоянии примерно 1 м от источника; длительность этих операций около 5—6 ч в неделю. Облучением организма во время всех остальных операций можно пренебречь.

На основании перечисленных данных получается следующий баланс облучения за неделю при работе с источником активностью $2 \text{ мг} \cdot \text{экв} \text{ радия}$ приведенный в таблице.

Расстояние от источника, м	Мощность дозы, p/ч	Время облучения, ч	Доза, p
Общее облучение организма			
0,4	$1,05 \cdot 10^{-2}$	1	0,01
1,0	$1,68 \cdot 10^{-3}$	6	0,01
			Итого 0,02

Облучение кистей рук

0,1	0,168	1	0,168
-----	-------	---	-------

Таким образом, максимальная доза облучения, которая имеет место при работах по определению плотности гамма-методом, примерно в 5 раз меньше ПДУ для всего тела и в 3 раза меньше для кистей рук.

Если считать, что половина допустимой дозы тело человека получает, находясь на расстоянии 0,4 м от источника, и половину дозы при расстоянии 1 м от источника, то при активности источника в $2 \text{ мг} \cdot \text{экв} \text{ радия}$ допустимое время работы составит 5 ч в неделю на расстоянии 0,4 м и 30 ч в неделю на расстоянии 1 м. Кисти рук могут находиться на расстоянии 10 см от источника активностью $2 \text{ мг} \cdot \text{экв} \text{ радия}$ 3 ч в неделю.

ОПИСАНИЕ ГРАФИКОВ ОСЛАБЛЕНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Графики (см. прилож. 7—12) характеризуют ослабление гамма-излучения точечного источника в безграничной среде. Они даются для трех типов источников — Co^{60} , Cs^{137} , Ra^{226} — и двух видов детекторов-счетчика Гейгера-Мюллера типа МС или СТС, экранированного 5 мм железа (обозначается Г-М) и сцинтилляционного счетчика NaI(Tl) , экранированного 1,2 мм свинца и 3,0 мм железа (обозначается NaI). На каждом рисунке указаны источник и детектор, для которых рассчитаны графики. Индекс графика указывает на группу элементов (см. табл. 1).

Графики для счетчика Г-М, экранированного 5 мм железа, можно также использовать для работ со счетчиками Г-М в легкой гильзе (1—2 мм алюминия), если графики предварительно сместить в сторону больших значений поверхностной плотности ρd : на 3,5% ρd для графиков группы Si, Al, Fe, Co, H_2O ; на 2% для графиков группы Ag. Графики группы W, Pb и U не сдвигаются.

Кроме основных графиков ослабления излучения в прилож. 13, 14, 15 приводятся графики для определения плотности смеси элементов группы Si с тяжелыми элементами группы W, Pb и U. Расчет этих графиков выполнен путем интерполяции по спектру.

Для удобства пользования графиками ослабления излучения в прилож. 16 приводится график десятичного логарифма отношения $\frac{I}{A}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

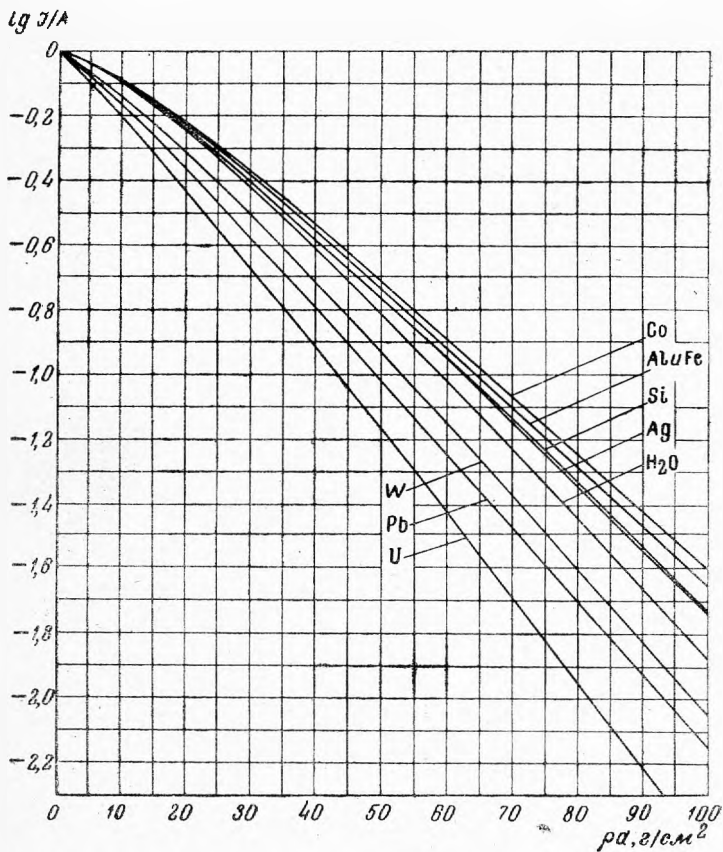
ДААННЫЕ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫХ ГРАФИКОВ
ОСЛАБЛЕНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Источник Co^{60} , детектор Г-М

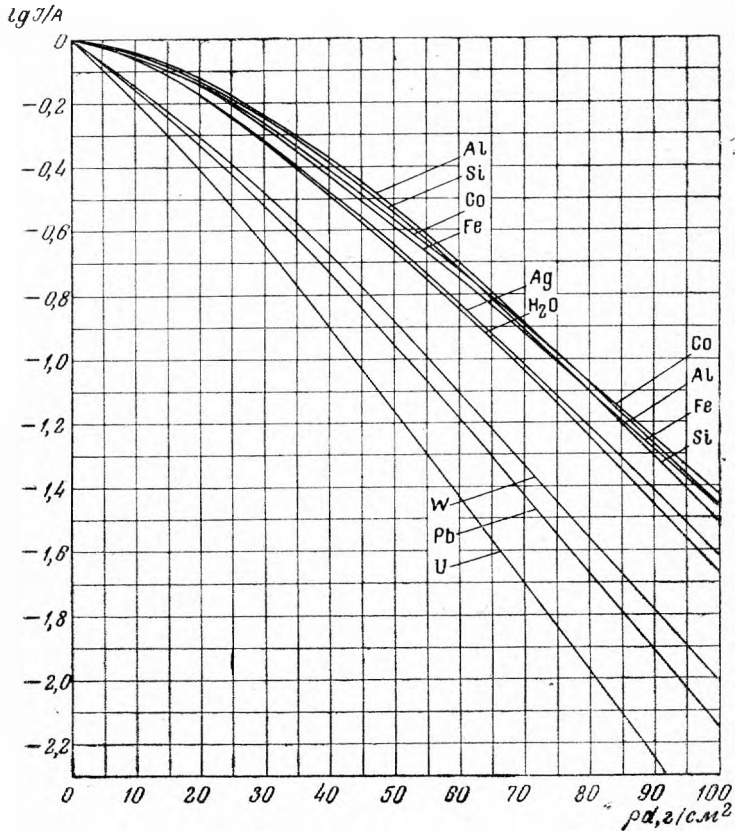
ρd , г/см ²	$-\lg \frac{I}{A}$								
	Si	Al	Fe	Co	Ag	H_2O	W	Pb	U
10	0,12	0,10	0,09	0,10	0,12	0,12	0,16	0,18	0,23
20	0,26	0,24	0,25	0,23	0,26	0,26	0,33	0,38	0,45
30	0,42	0,40	0,41	0,39	0,43	0,43	0,52	0,60	0,69
40	0,59	0,57	0,57	0,55	0,60	0,62	0,73	0,81	0,94
50	0,77	0,75	0,75	0,72	0,78	0,82	0,95	1,03	1,19
60	0,95	0,93	0,93	0,90	0,97	1,03	1,16	1,25	1,45
70	1,15	1,11	1,11	1,08	1,16	1,24	1,39	1,48	1,71
80	1,34	1,30	1,30	1,26	1,36	1,45	1,61	1,71	1,97
90	1,54	1,48	1,48	1,44	1,56	1,66	1,84	1,93	2,23
100	1,74	1,66	1,67	1,62	1,76	1,88	2,06	2,16	2,50

Данные для группы Si

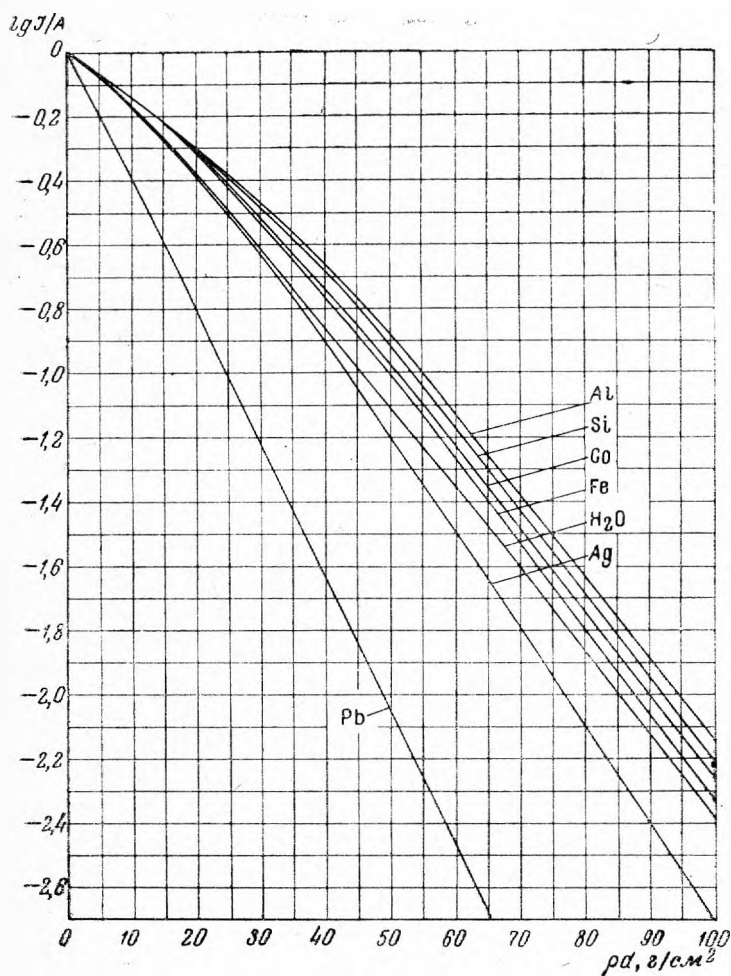
$\rho d,$ $z, \text{см}^2$	$-\lg \frac{I}{A}$				
	$\text{Co}^{60}, \text{NaI}$	$\text{Cs}^{137}, \text{Г-М}$	$\text{Cs}^{137}, \text{NaI}$	$\text{Ra}^{226}, \text{Г-М}$	$\text{Ra}^{226}, \text{NaI}$
10	0,05	0,13	0,10	0,11	0,09
20	0,14	0,30	0,26	0,26	0,21
30	0,25	0,48	0,43	0,41	0,37
40	0,38	0,68	0,63	0,58	0,54
50	0,54	0,92	0,87	0,76	0,73
60	0,72	1,17	1,12	0,94	0,92
70	0,91	1,43	1,40	1,12	1,11
80	1,10	1,68	1,68	1,31	1,31
90	1,30	1,94	1,96	1,49	1,51
100	1,51	2,20	2,24	1,68	1,70



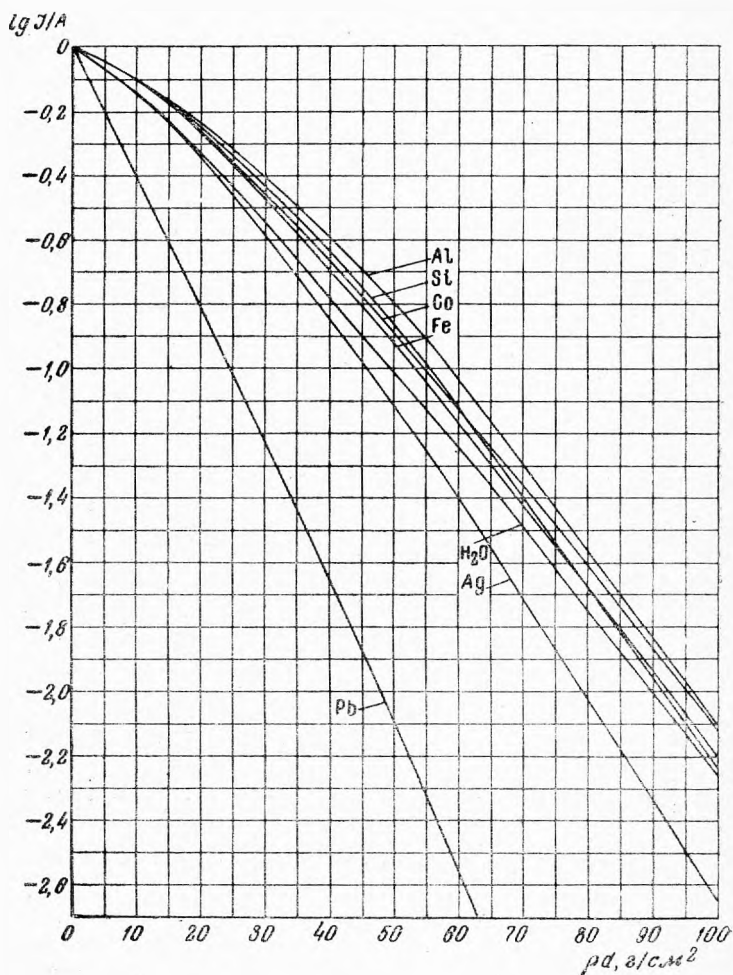
Графики ослабления гамма-лучей. Источник Co^{60} , детектор Г-М. Экспериментальные графики: Al, Fe, Si, H₂O. Рассчитанные графики: Co, Ag, W, Pb, U



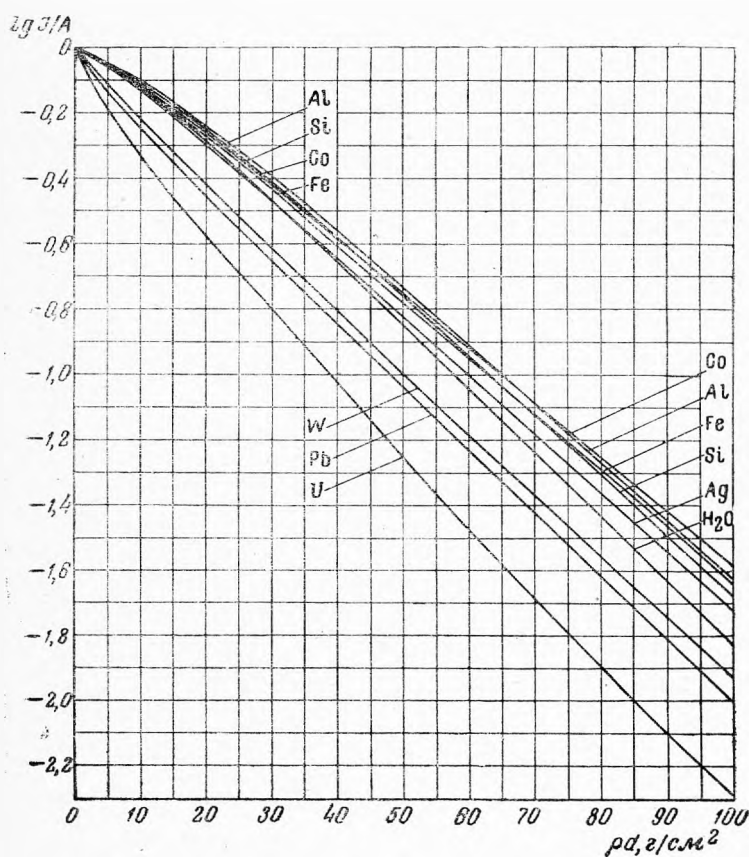
Графики ослабления гамма-лучей. Источник Co^{60} , детектор NaJ. Экспериментальные графики: Si, Fe. Рассчитанные графики: Co, Al, Ag, H₂O, W, Pb, U



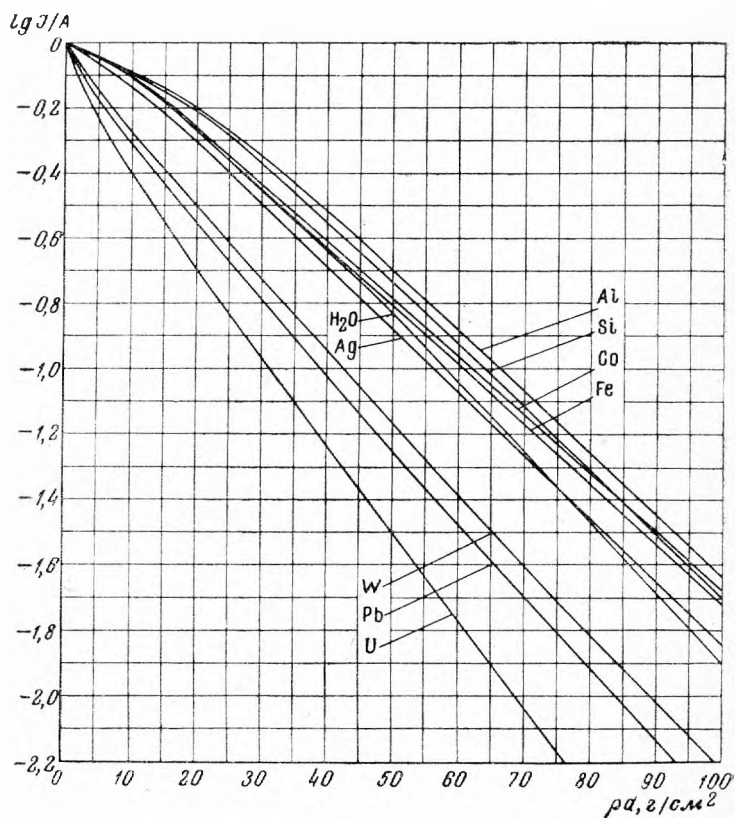
Графики ослабления гамма-лучей. Источник Cs^{137} , детектор Г-М. Экспериментальные графики: Si, Fe, Pb. Рассчитанные графики: Al, Co, Ag, H_2O



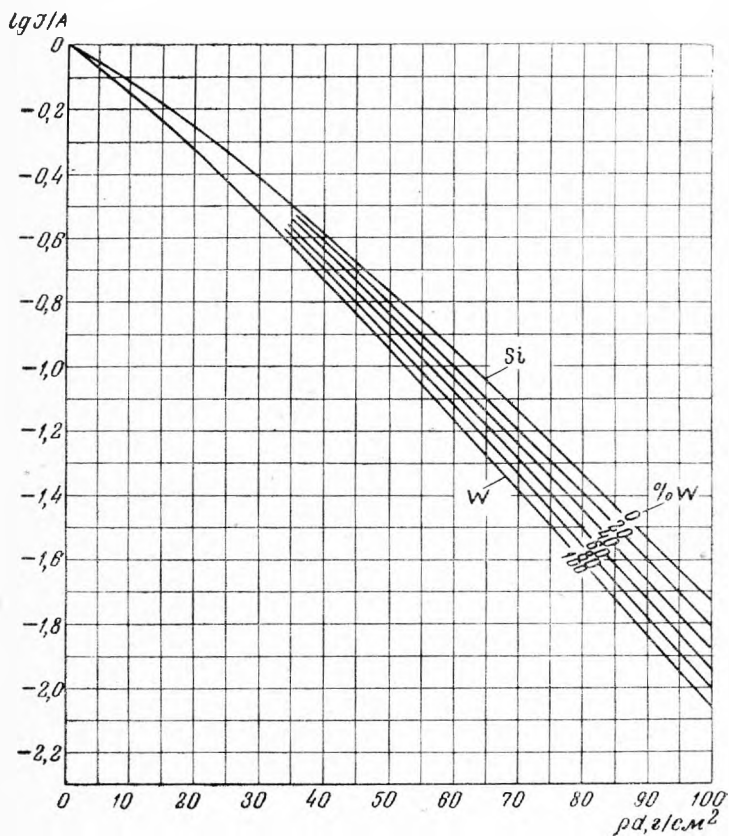
Графики ослабления гамма-лучей. Источник Cs^{137} , детектор NaJ. Экспериментальные графики: Si, Fe, Pb. Рассчитанные графики: Al, Co, Ag, H_2O



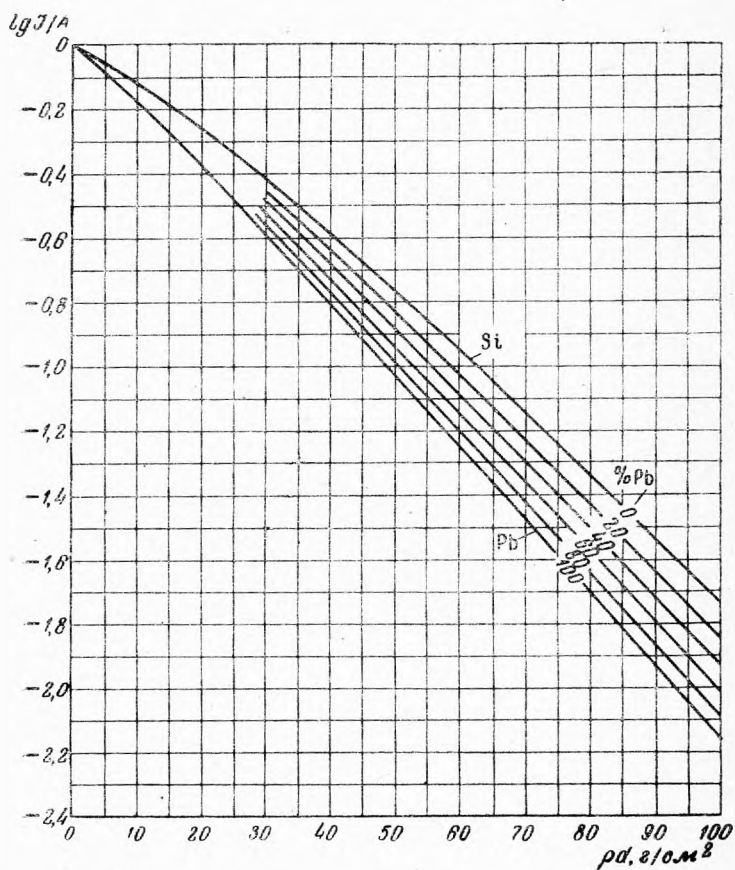
Графики ослабления гамма-лучей. Источник Ra^{226} , детектор Г.-М. Экспериментальные графики: Al, Si, Fe, H_2O , Pb. Рассчитанные графики: Co, Ag, W, U



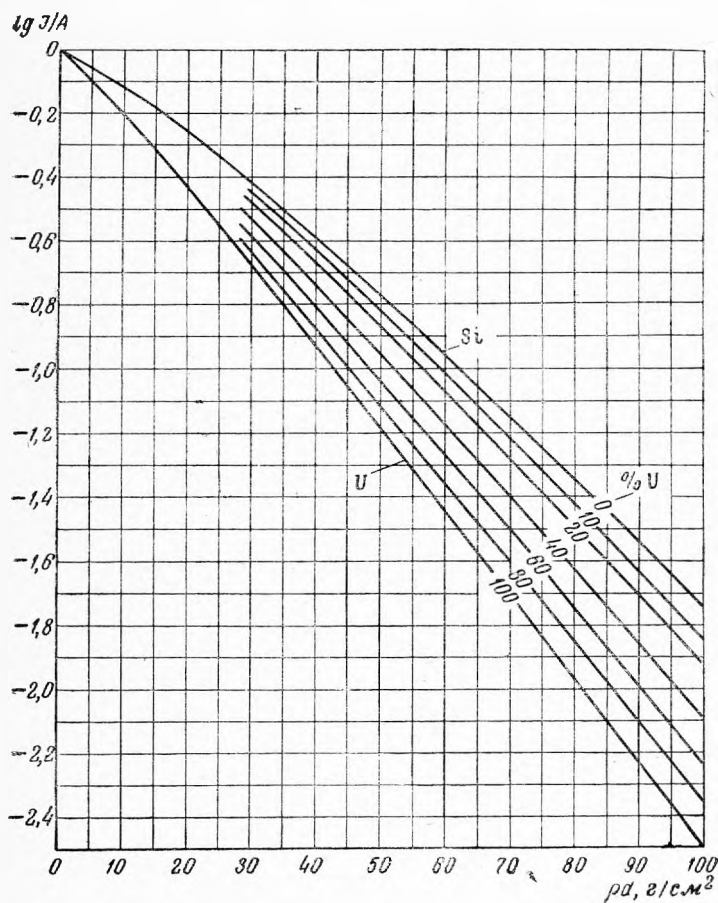
Графики ослабления гамма-лучей. Источник Ra^{226} , детектор NaJ. Экспериментальные графики: Si, Fe, Pb. Рассчитанные графики: Al, Co, Ag, H₂O, W, U



Графики ослабления гамма-лучей в смеси Si—W. Источник Co^{60} , детектор Г-М



Графики ослабления гамма-лучей в смеси Si—Pb. Источник Co^{60} , детектор Г-М



Графики ослабления гамма-лучей в смеси Si—U. Источник Co^{60} , детектор Г-М

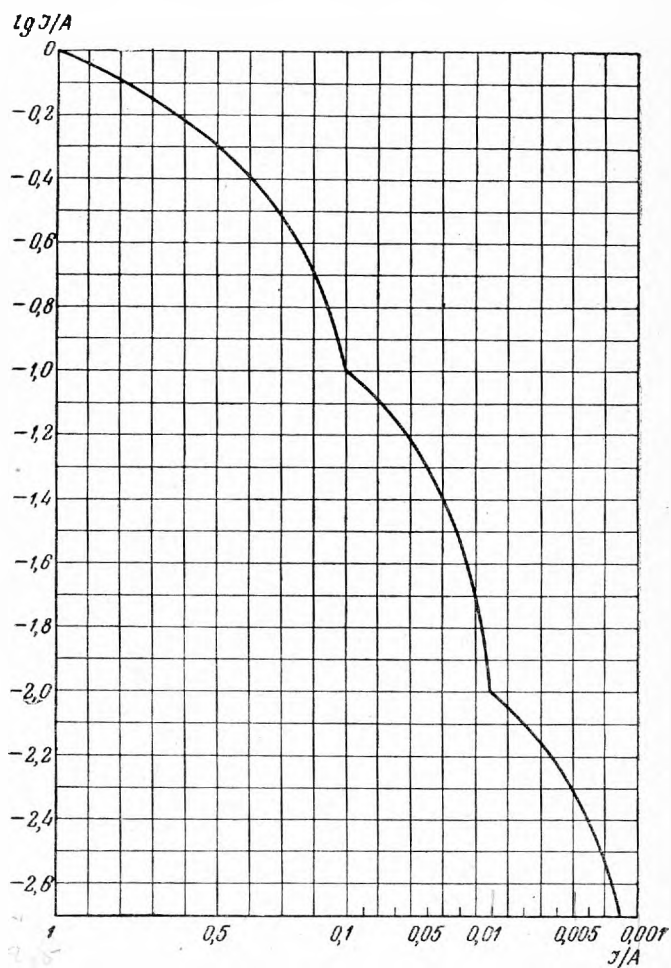


График десятичного логарифма

ЛИТЕРАТУРА

1. Аглинцев К. К. Дозиметрия ионизирующих излучений. Гостехтеориздат, 1957.
2. Арцыбашев В. А. Гамма-излучение точечного изотропного источника в однородной среде. В сб.: «Вопросы разведочной геофизики», вып. 1. Гостоптехиздат, 1962.
3. Бабинцев А. Е., Звольский С. Т. Исследование плотности и влажности грунтов методами радиоактивных излучений. Тр. Ин-та геол. наук АН УССР, вып. 6, Киев, 1961.
4. Баранов В. И. Радиометрия. Изд. АН СССР, 1955.
5. Бовин В. П. К вопросу об эффективности газоразрядных счетчиков. «Атомная энергия», т. 8, вып. 1, 1960.
6. Бовин В. П. Экспериментальное исследование эффективности сцинтилляционных счетчиков. «Атомная энергия», т. 8, вып. 2, 1960.
7. Горшков Г. В. Гамма-излучение радиоактивных тел и элементы расчета защиты от излучения. Изд. АН СССР, 1959.
8. Гусев Н. Г. Справочник по радиоактивным излучениям и защите. Медгиз, 1956.
9. Данилин А. И. Применение ядерных излучений в гидрометеорологии. Гидрометеониздат, 1957.
10. Завельский Ф. С. Определение плотности и влажности грунта методом поглощения гамма-излучения в геометрии узкого и широкого пучка лучей. «Разведка и охрана недр», № 9, 1958.
11. Кодочигов П. Н., Юрьев К. В. К определению плотности грунта просвечиванием гамма-лучами. Изв. АН СССР, ОТН, № 8, 1955.
12. Лейпунский О. И., Новожилов Б. В., Сахаров В. Н. Распространение гамма-квантов в веществе. Физматгиз, 1960.
13. Нестеров В. Е. Абсолютные измерения плотности почв и грунтов в полевых условиях гаммаскопическим методом. Автореферат дисс. на соискание уч. степени к. т. н. ВАСХНИЛ, Агрофизический ин-т, Л., 1960.
14. Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд. Под ред. В. В. Алексеева и др. Госгеолтехиздат, 1957.
15. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений. Госатомиздат, 1960.
16. Смирнов В. И. Подсчет запасов минерального сырья. Госгеолтехиздат, 1950.
17. Татарников А. А. Определение объемного веса руд по ослаблению гамма-лучей. «Разведка и охрана недр», № 4, 1957.
18. Ферронский В. И. Применение радиоактивных излучений для определения плотности и влажности грунтов. Дисс. М., 1956. (Фонды ГПБ им. Ленина).
19. Филиппов Е. М., Кузнецов Г. А. Определение плотностей горных пород и руд в обнажениях и горных выработках с помощью метода рассеянного гамма-излучения. «Разведка и охрана недр», № 9, 1959.

20. Цылин С. Г., Кухтевич В. И., Казанский Ю. А. Прохождение гамма-лучей через воду, железо, свинец и комбинации железа и свинца. «Атомная энергия», № 2, 1956.

21. Як ж и н А. А. Опробование и подсчет запасов твердых полезных ископаемых. Госгеолтехиздат, 1954.

22. Я куб о в и ч А. Л. Поисково-разведочная радиометрическая аппаратура. Госгеолтехиздат, 1960.

23. Berdan D., Bernhard R. K. Proc. Amer. Soc. Test. Mater., 1950, vol. 50, 1328.

24. Bernhard R. K., a. Chasek M. Nondestr. Test., 1953, vol. XI, № 8, 17.

25. Bernhard R. K., Chasek M. Proc. Amer. Soc. Test. Mater., 1955, vol. 55, 1199.

26. Gruhle. Bautechnik, 1957, № 3, 81.

27. Homilius J. a. Lorch S. Geoph. Prosp., 1957, vol. 5, № 4, 449.

28. Lorenz H. Baum. u. Bautechn., 1954, Nov., 173.

29. Neuber H. Baum. u. Bautechn., 1954, Nov., 179.

30. Wendt I. Geol. Jahrb., Hannover, 1954, 70. 1.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Предисловие	3
<i>Глава I. Теория метода определения плотности сложных сред по ослаблению гамма-лучей в широком пучке</i>	<i>5</i>
Введение	5
Физические основы гамма-метода определения плотности	7
<i>Глава II. Определение плотности горных пород и руд</i>	<i>13</i>
Определение плотности горных пород	13
Определение плотности руд	15
Способы учета структуры руд при определении их плотности	17
<i>Глава III. Методика и техника определения плотности горных пород и руд по методу ослабления гамма-лучей в широком лучке</i>	<i>18</i>
Аппаратура, источники гамма-лучей и вспомогательное оборудование	18
Подготовка к полевым работам	22
Методика и техника полевых работ	23
Обработка результатов полевых наблюдений	29
Документация и отчетность	34
Приложения	35
Л и т е р а т у р а	57

Владимир Александрович Арцыбашев

КРАТКОЕ РУКОВОДСТВО
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПЛОТНОСТИ ПОРОД
И РУД МЕТОДОМ ОСЛАБЛЕНИЯ
ГАММА-ЛУЧЕЙ

Редактор *И. Ф. Попретинский*

Редактор издательства *Т. И. Борушко*

Технический редактор *А. Г. Иванова*

Корректор *К. Н. Ильина*

Сдано в набор 25/III 1963 г.

Подписано к печати 11/VI 1963 г.

Формат бумаги 60×90¹/₁₆ Бум. л. 1,88

Печ. л. 3,75 Уч.-изд. л. 3,19 Т-06668

Тираж 1000 экз. Зак. 330. Цена 16 коп.

Картфабрика Госгеолтехиздата
Ленинград В-26, 19 линия, дом 20.



12320 (12)

31