

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

М. Г. ВЕРУТИН, О. Н. КОБРУСЕВА

ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ: ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Практическое пособие

для студентов специальности

1 – 51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых»
специализации

1– 51 01 01 02 «Геофизические методы поисков и разведки»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2021

УДК 550.832.5(076)
ББК 26.347.311я73
В31

Рецензенты:

ведущий геофизик отдела формирования и ведения банка данных
РУП «Производственное объединение
«Белоруснефть» БелНИПИнефть» Д. Н. Гребеньков,
д-р физ.-мат. наук Г. С. Митюрин

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Верутин, М. Г.

В31 Ядерно-геофизические методы исследований: практические работы : практическое пособие / М. Г. Верутин, О. Н. Кобрусева ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – 35 с.

ISBN 978-985-577-778-7

Практическое пособие содержит краткие теоретические сведения и задания к практическим работам по курсу «Ядерно-геофизические методы исследований».

Предназначено студентам специальности 1 – 51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых» специализации 1 – 51 01 01 02 «Геофизические методы поисков и разведки».

УДК 550.832.5(076)
ББК 26.347.311я73

ISBN 978-985-577-778-7

© Верутин М. Г., Кобрусева О. Н., 2021
© Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Практическая работа 1. Законы радиоактивного распада и радиоактивные равновесия.....	5
Практическая работа 2. Единицы радиоактивности	10
Практическая работа 3. Взаимодействие гамма-квантов с веществом...	15
Практическая работа 4. Раздельное определение удельной активности радона и торона по данным профильной эманиционной съемки.....	21
Практическая работа 5. Графическая интерпретация диаграмм интегрального гамма-каротажа.....	24
Литература.....	32
Приложение А. Номограмма для определения характеристик рудного пласта.....	33
Приложение Б. Номограмма для определения границ рудного интервала способом $Z_{1/2}$	34
Приложение В. Номограмма для определения $2I_0$ в способе Z_0	35

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Ядерно-геофизические методы исследований» в учебном плане специальности 1 – 51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых» относится к циклу дисциплин специализации 1 – 51 01 01 02 «Геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых» компоненты учреждения высшего образования первой ступени.

В настоящее время методы ядерной геофизики очень широко используются в геологии, гидрогеологии, инженерной геологии и экологии для решения очень широкого круга задач. По сравнению с традиционными методами, методы ядерной геофизики менее трудоемки, более оперативны и позволяют проводить определение параметров горных пород в естественных залеганиях. Этим и определяется необходимость и актуальность изучения данного спецкурса студентами.

Целью практического пособия является закрепление теоретических знаний, полученных в ходе изучения лекционного материала по курсу «Ядерно-геофизические методы исследований».

Практическое пособие состоит из 5 практических работ, обеспечивает формирование необходимых умений и навыков по дисциплине, позволяющих изучить современные радиометрические и ядерные методы для поисков и разведки полезных ископаемых.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 1

ЗАКОНЫ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА И РАДИОАКТИВНЫЕ РАВНОВЕСИЯ

Распад каждого отдельного атома происходит независимо от других атомов, поэтому его можно рассматривать как явление случайное, не зависящее от внешних условий.

Процесс радиоактивного распада подчиняется определенному закону – *закону радиоактивного распада*. Согласно этому закону, число атомов, распадающихся за малый промежуток времени dt , пропорционально наличному числу атомов N . При условии, что в начальный момент при $t = 0$, число атомов равно N_0 , а по прошествии времени t число атомов равно N , имеем:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где λ – постоянная распада радионуклида, характеризующая скорость его превращений (размерность с^{-1}).

Это уравнение показывает, сколько атомов останется нераспавшимися по истечении времени t из начального числа атомов N_0 .

Кроме постоянной распада скорость радиоактивного превращения характеризуют периодом полураспада $T_{1/2}$ и средним временем жизни данного радионуклида τ .

Период полураспада радионуклида $T_{1/2}$ – это промежуток времени, в течение которого распадается половина всех его атомов.

Связь между константами λ , $T_{1/2}$ и τ имеет вид:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = \frac{T_{1/2}}{0,693} = 1,43 T_{1/2}.$$

Для приближенных расчетов следует помнить, что величина $t = 10 T_{1/2}$ представляет собой время практически полного распада радиоэлемента, так как по истечении этого времени останется меньше 0,1 % первоначального числа атомов.

Радиоактивный изотоп, распадаясь, может дать начало новому радиоэлементу.

Количество накапливающегося со временем второго радиоактивного элемента может быть рассчитано по формуле

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{02} e^{-\lambda_2 t}.$$

Второй член в этом уравнении представляет собой то число атомов второго элемента, которое осталось к моменту времени t от начального числа атомов этого элемента, если последнее не равнялось нулю. Этот член уменьшается по простому показательному закону. Первый член вначале равен нулю, затем, в момент времени t_m проходит через максимум и далее уменьшается по закону, который в пределе соответствует скорости убывания того из двух показательных членов, для которого λ меньше.

Для случая n последовательно распадающихся радиоэлементов число атомов любого вещества N_n будет суммой членов:

$$N_n = N_{n1} + N_{n2} + N_{n3} + \dots + N_{n,n-1} + N_{n,n}.$$

В предположении, что в начальный момент времени имелось только первое (материнское) вещество, количество любого вещества в любой момент времени t определяется:

$$N_n = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1} N_{01} \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} + \dots + \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \right].$$

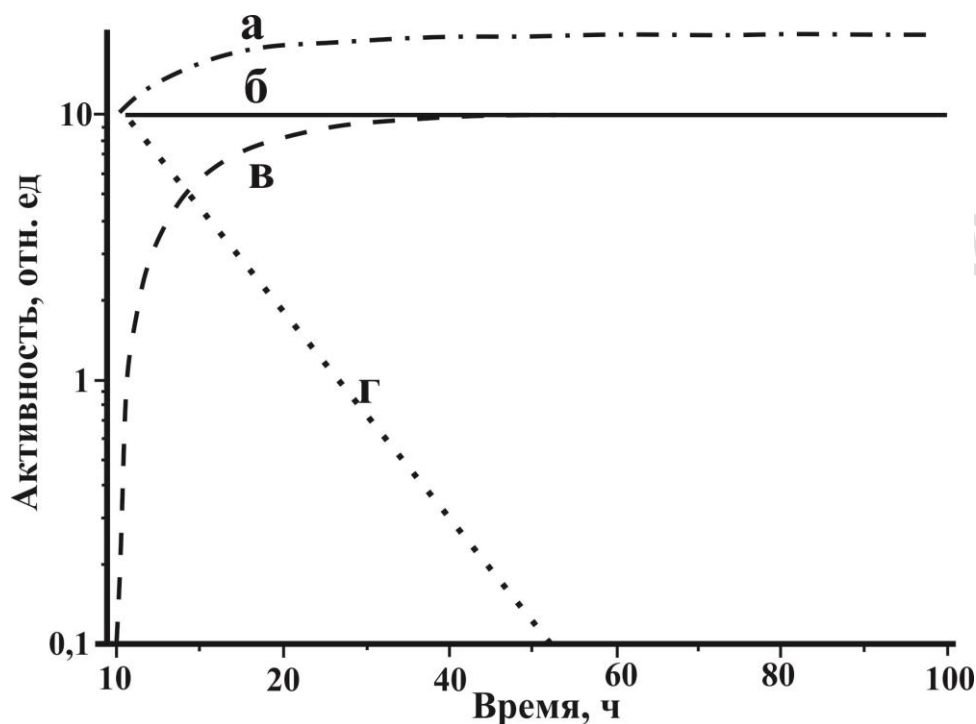
Из формул, представленных выше, видно, что число атомов первого и последующих радиоэлементов в ряду превращений зависит от соотношения между постоянными их распада.

Если период полураспада материнского вещества настолько велик, что распадом его можно пренебречь по сравнению с распадом его производных ($\lambda_1 \ll \lambda_2$, $\lambda_1 \ll \lambda_3$ и т. д.), то в ряду радиоактивных элементов возникает состояние, называемое *вековым или устойчивым* радиоактивным равновесием.

В этом случае числа распадающихся в единицу времени атомов всех элементов одинаковы. Математически состояние устойчивого равновесия выражается соотношением:

$$N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2 = \dots = N_n\lambda_n.$$

Характерные кривые изменения активности для векового равновесия представлены на рисунке 1.



- а – полная активность материнского и дочернего радионуклидов;
 б – прямая активности материнского изотопа;
 в – кривая изменения активности дочернего изотопа;
 г – прямая, характеризующая распад чистого дочернего изотопа

Рисунок 1 – Вековое равновесие

Радиоактивное равновесие в рядах практически наступает спустя время $10T_k$, где T_k – период полураспада k -го дочернего нуклида с наибольшей продолжительностью жизни.

Если постоянные распада элементов в ряду радиоактивных превращений соизмеримы по величине, но последующее вещество более короткоживущее, чем исходное, то для радиоактивной цепи, состоящей из n звеньев, справедлива формула

$$N_1\lambda_1\lambda_2 \dots \lambda_n = N_n(\lambda_n - \lambda_1)(\lambda_{n-1} - \lambda_1) \dots (\lambda_2 - \lambda_1).$$

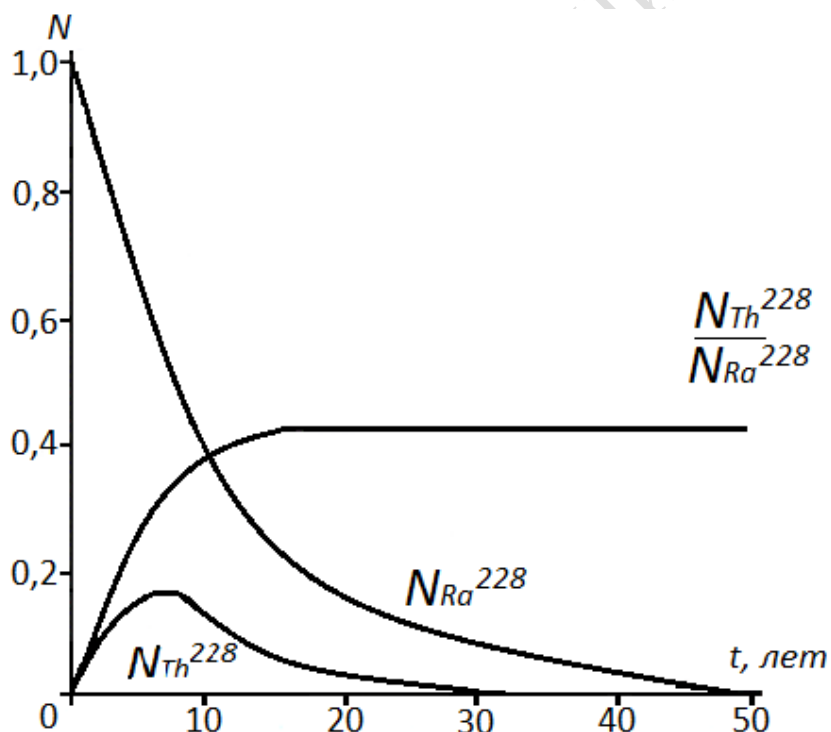
Это состояние радиоактивного равновесия называется *подвижным равновесием*. Суммарное количество материнского вещества и его произ-

водных в этом случае уменьшается с периодом полураспада, характерным для материнского вещества.

Частным случаем является подвижное равновесие двух веществ ($\lambda_1 < \lambda_2$), математическое выражение которого имеет вид:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

В состоянии подвижного равновесия первое и второе вещества существуют вместе до полного распада, при этом количество атомов материнского и дочернего веществ убывает, но отношение числа распадающихся атомов дочернего вещества к числу распадающихся атомов материнского вещества, как видно из формулы, есть величина постоянная. Графически состояние подвижного равновесия изображено на рисунке 2, где рассматривается состояние равновесия между радоном и короткоживущими продуктами его распада.



Элемент Ra^{228} обладает периодом полураспада $T = 6,7$ лет, а элемент Th^{228} обладает периодом полураспада $T = 2$ года

Рисунок 2 – Подвижное равновесие

Время наступления подвижного равновесия $t_{п.р.}$ можно найти по формуле

$$t_{п.р.} = \frac{6,93}{(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{10T_1T_2}{T_1 - T_2},$$

где T_1 и T_2 – периоды полураспада соответственно материнского и дочернего веществ.

Для случая двух веществ, при соотношении ($\lambda_1 > \lambda_2$), в пределе остается лишь дочернее вещество, материнское вещество полностью распадается.

Задание

- 1 Для заданных радиоактивных элементов радиоактивного ряда рассчитать постоянные радиоактивного распада λ .
- 2 Определить, какому условию равновесия удовлетворяет данная система, и написать это условие равновесия.
- 3 Написать уравнение убыли первого элемента.
- 4 Написать уравнение накопления второго элемента, при условии, что при $t = 0$ второй элемент системы отсутствовал.
- 5 Определить время установления соответствующего равновесия в данной системе (с точностью 0,1 %).
- 6 Построить графики изменения во времени активности первого и второго элементов, график отношения первого и второго элементов (для случая подвижного равновесия) и по ним определить время наступления соответствующего равновесия.

Контрольные вопросы

- 1 Сформулируйте основной закон радиоактивного распада.
- 2 Что характеризует скорость радиоактивного распада?
- 3 Что такое период полураспада радиоактивного элемента?
- 4 При каких условиях наступает подвижное радиоактивное равновесие?
- 5 При каких условиях наступает устойчивое радиоактивное равновесие?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 2

ЕДИНИЦЫ РАДИОАКТИВНОСТИ

Для сравнительной оценки радиоактивности горных пород применяются два вида единиц: *единицы активности*, или содержания в породах радиоактивных элементов, и *единицы дозы*, определяющие меру воздействия радиоактивных излучений на вещество.

Активность радиоактивного нуклида A – это число спонтанных ядерных превращений dN этого нуклида за малый промежуток времени dt , деленное на это время:

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{0,693}{T_{1/2}} N.$$

В системе СИ активность измеряют в *беккерелях (Бк)*. 1 Бк – это такая активность нуклида в радиоактивном источнике, в котором за 1 сек происходит один акт распада (*беккерель (Бк) = расп/с*).

На практике часто пользуются внесистемной единицей активности *кюри (Ки)*. Под единицей кюри понимается количество любого радиоактивного изотопа, в котором в 1 с происходит в среднем $(3,7 \cdot 10^{10})$ распадов, примерно столько же, сколько и в 1 г радия

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/с}; 1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}.$$

В практике часто используются единицы, производные от кюри: милликюри мКи (10^{-3} Ки), микрокюри мкКи (10^{-6} Ки). Единицей концентрации радиоактивного изотопа в некотором веществе является Ки/кг и ее производные, а также Ки/м^3 и ее производные. Концентрация радона и других газообразных радиоэлементов выражается в единицах кюри на литр (Ки/л) и в единицах *эман* ($\text{эман} = 10^{-10} \text{ Ки/л} = 10^{-7} \text{ Ки/м}^3$).

Согласно закону радиоактивных превращений, число ядер радиоактивного изотопа, распадающихся за 1 с, равно N . Тогда число ядер изотопа, соответствующее 1 Ки, можно определить по формуле

$$N = \frac{3,7 \cdot 10^{10}}{\lambda} = 3,7 \cdot 10^{10} \frac{T_{1/2}}{0,693}.$$

А массу изотопа (g), излучающего эту активность, по формуле

$$m = \frac{NA_m}{N_A} = 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot A_m T_{1/2},$$

где A_m – атомная масса изотопа;

$N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро;

$T_{1/2}$ – период полураспада изотопа.

Из этой формулы видно, что масса радиоактивных элементов возрастает с увеличением периода полураспада при их активности, равной 1 Ки.

Между активностью A и массой m радиоактивного вещества существует связь. Зная, что в атомной массе любого радионуклида содержится $6,023 \cdot 10^{23}$ атомов (число Авогадро), получаем активность радионуклида в Бк массой m :

$$A = m \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \frac{0,693}{A_m T_{1/2}}.$$

Соответственно массу радионуклида в г активностью A можно рассчитать по формуле

$$m = A \cdot 0,24 \cdot 10^{-23} A_m T_{1/2}.$$

Меру воздействия ионизирующих излучений на вещество оценивают единицами дозы.

Поглощенная доза D характеризует количество энергии ионизирующего излучения, поглощенное облучаемым телом, в пересчете на единицу массы. Системная единица измерения поглощенной дозы *грей (Гр)*, внесистемная – *Рад*.

Приращение поглощенной дозы в единицу времени называется *мощностью поглощенной дозы P* и измеряется в *Гр/с (Рад/с)* или их производных.

Экспозиционная доза X характеризует ионизирующее действие излучения и представляет собой отношение суммарного заряда dQ всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой dm , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме.

Единица экспозиционной дозы в СИ – *кулон на килограмм (Кл/кг)*. Внесистемная единица экспозиционной дозы – *рентген (Р)*.

Экспозиционная доза, образуемая излучением в единицу времени, называется *мощностью экспозиционной дозы ($\dot{Y}$)* и выражается в рентгенах в час (*Р/ч*), а также в производных единицах: *мР/ч* и *мкР/ч*.

Ионизационное действие гамма-излучения любых радиоактивных препаратов оценивают сравнением с радиевым эталонным источником при одинаковых условиях измерения. Так появилась величина, называемая *гамма-эквивалентом (радиевый гамма-эквивалент)*, которая измеряется в миллиграмм-эквивалентах радия (*мг-экв Ra*) или грамм-эквивалентах радия (*г-экв Ra*).

Миллиграмм-эквивалент радия M (мг-экв Ra) – единица гамма-эквивалента радиоактивного препарата интенсивность γ -излучения которого эквивалентна интенсивности γ -излучения 1 г радия (в равновесии с продуктами распада), заключенного в платиновый фильтр толщиной 0,5 мм. Экспериментально установлено, что точечный источник Ra активностью 1 *мКи*, находящийся в равновесии со всеми продуктами распада, с фильтром из пластины толщиной 0,5 мм, создает на расстоянии 1 см мощность экспозиционной дозы, равной $8,4 \cdot P/\text{ч}$ (*гамма-постоянная радия*). Значение гамма постоянной Ra ($K_{\gamma\text{Ra}} = 8,4 \cdot P \text{ см}^2/\text{ч} \cdot \text{мКи}$) принимается за эталон для сравнения мощности дозы от источников гамма-излучения, имеющих различные, гамма постоянные.

Связь между мощностью экспозиционной дозы излучения Y ($\text{мР}/\text{ч}$) и гамма-эквивалентом M (*мг-экв Ra*) точечного источника, на расстоянии R (*см*) выражается следующим образом:

$$Y = \frac{M \cdot 8,4 \cdot 10^3}{R^2}.$$

Гамма-эквивалент M (*мг-экв Ra*), радиоактивного источника активностью A (*Бк*), может быть рассчитан с использованием гамма-постоянной по формуле

$$M = \frac{A \cdot K_{\gamma}}{3,7 \cdot 10^7 \cdot 55,3},$$

где $3,7 \cdot 10^7$ – активность в *Бк* источника с гамма-эквивалентом 1 *мг-экв Ra* (1 *мг* радия соответствует $3,7 \cdot 10^7 \text{ Бк}$);

$55,3 \text{ аГр} \cdot \text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{Бк})$ – керма-постоянная радия в равновесии с основными дочерними продуктами распада после платинового фильтра толщиной 0,5 мм.

Гамма-постоянная K_{γ} данного радионуклида численно равна мощности экспозиционной дозы ($P/\text{ч}$), созданной излучением точечного изотропного источника активностью в 1 *мКи* на расстоянии 1 см без начальной фильтрации:

$$K_{\gamma} = Y \frac{R^2}{A} (P \cdot \text{см}^2/\text{ч} \cdot \text{мКи}),$$

где Y – мощность экспозиционной дозы, $P/\text{ч}$;

A – активность, мКи ;

R – расстояние, см .

Гамма-постоянные радионуклидов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Гамма-постоянные и керма-постоянные некоторых радионуклидов

Радионуклид	Период полураспада	Керма-постоянная $K_{\sigma}, \text{аГр} \cdot \text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{Бк})$	Гамма-постоянная $K_{\gamma}, \text{см}^2/\text{ч} \cdot \text{мКи}$
Na^{24}	15 ч	118,8	18,3
Co^{60}	5,272 года	44,06	6,724
Br^{82}	35,5 ч	64,50	9,842
Cs^{137}	30,17 года	21,24	3,242
Ra^{226}	1600 лет	59,18	9,031
U^{238}	$4,468 \cdot 10^9$ лет		
Pu^{239}	24065 лет		

Таким образом, зная активность источника, его гамма-постоянную и расстояние, можно рассчитать экспозиционную дозу или мощность экспозиционной дозы, которую он создает по формулам:

$$X = \frac{A \cdot K_{\gamma} \cdot t}{R^2}, Y = \frac{A \cdot K_{\gamma}}{R^2}.$$

Для вычисления поглощенной дозы или мощности поглощенной дозы на расстоянии R от источника излучения использовались формулы:

$$D = \frac{A \cdot K_{\sigma} \cdot t}{R^2}, \quad P = \frac{A \cdot K_{\sigma}}{R^2},$$

где D – поглощенная доза, Гр ;

P – мощность поглощенной дозы, $\text{мкГр}/\text{ч}$;

R – расстояние от источника до точки измерения, м ;

K_{σ} – керма-постоянная радионуклида (табличное значение).

Керма-постоянная – суммарная начальная кинетическая энергия заряженных частиц, образованных в единице массы облучаемой среды под действием косвенно ионизирующего излучения.

Применительно к гамма-излучению в условиях электронного равновесия керма совпадает с дозой излучения, т. е. керма является энергетическим эквивалентом экспозиционной дозы. В системе СИ единицей кермы является *Грей (Гр)*. Внесистемная единица кермы – *рад*.

Задание

В соответствии с вариантом выполнить расчеты.

Вариант 1. Определить массу свинца, который образуется из $1,0 \text{ кг } \text{U}^{238}$ за период, равный возрасту Земли ($2,5 \cdot 10^9 \text{ лет}$).

Вариант 2. Определить мощность экспозиционной дозы, создаваемую источником Co^{60} активностью 900 мКи на расстоянии $0,5 \text{ м}$ от препарата.

Вариант 3. Рассчитать массу с активностью $1 \text{ Ки } \text{U}^{238}$, если $T_{1/2} = 4,468 \cdot 10^9 \text{ лет}$.

Вариант 4. Определить активность 1 г Ra , находящегося в равновесии с дочерними продуктами распада.

Вариант 5. Определить массу радионуклида Co^{60} , если он на расстоянии 50 см создает мощность экспозиционной дозы 200 мкР/ч . Источник изготовлен $04.03.2016 \text{ г}$.

Вариант 6. Определить массу радионуклида Cs^{137} активностью 43 мКи . Рассчитать мощность поглощенной и экспозиционной доз от источника на расстоянии 30 см .

Вариант 7. Для градуировки радиометрической аппаратуры используется контрольный источник Co^{60} . По паспортным данным источник выпущен $1.03.2015 \text{ г}$ и его начальная активность A_0 составляла 128 кБк . Определить его активность на данный момент. Рассчитать поглощенную и экспозиционную дозу от источника на расстоянии 20 см .

Вариант 8. Первоначальная активность Co^{60} равна 38 мКи . $T_{1/2} = 5,27 \text{ года}$. Определить его активность через 3 года . Рассчитать, какую мощность поглощенной и экспозиционной доз будет создавать источник на расстоянии 30 см .

Вариант 9. Определить число радиоактивных ядер в свежеприготовленном препарате Br^{82} , если известно, что через сутки его активность стала равной $7,4 \cdot 10^9 \text{ Бк}$ ($0,20 \text{ Ки}$).

Вариант 10. Начальная активность контрольного источника Cs^{137} по паспорту равна $15\,990 \text{ Бк}$. Определить активность источника на сегодняшний день и рассчитать экспозиционные дозы, создаваемые источником при активностях A и A_0 на расстоянии 45 см . Дата выпуска источника $15.02.2014 \text{ г}$.

Вариант 11. Активность радионуклида Cs^{137} на сегодняшний день составляет 18 мКи. Рассчитать, какую мощность поглощенной и экспозиционной доз создает данный источник на расстоянии 10 и 40 см.

Вариант 12. Определить мощность экспозиционной дозы, создаваемую источником Co^{60} активностью 900 мКи на расстоянии 0,5 м от препарата.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое активность? Назовите единицы ее измерения.
- 2 Что характеризует поглощенная доза? Назовите единицы ее измерения.
- 3 Сформулируйте основной закон радиоактивного распада.
- 4 Что такое экспозиционная доза? Назовите единицы ее измерения.
- 5 Как определяют мощность дозы?
- 6 Что такое гамма-постоянная? Определите керма-постоянную радионуклидов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАММА-КВАНТОВ С ВЕЩЕСТВОМ

Гамма-излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение. Спектр энергии γ -излучения, испускаемого одним и тем же веществом, линейчатый. Энергии γ -излучения естественных радиоэлементов изменяются в пределах от 0,02 до 2,62 Мэв.

Гамма-излучение обладает наибольшей проникающей способностью и поэтому гамма-кванты способны проходить через слой твердого вещества в несколько десятков сантиметров, при этом испытывают ослабление в результате взаимодействия γ -квантов с веществом.

При этом основными эффектами взаимодействия являются следующие:

- комптон-эффект (комптоновское рассеяние);
- фотоэффект;
- эффект образования пар.

Вероятность взаимодействия γ -квантов с веществом количественно характеризуют *эффективным сечением* взаимодействия или микроскопическим сечением, под которым понимают площадь поперечного сечения,

условно приписываемую ядру атома, частице или системе частиц, проходя через которую, γ -квант испытывает данное взаимодействие.

Произведение эффективного сечения отдельного процесса на число электронов (атомов) в 1 см^3 вещества называют *линейным коэффициентом ослабления* γ -излучения или макроскопическим сечением: σ_a – для поглощения при комптоновском эффекте, τ – для фотоэффекта и κ – для эффекта образования пар.

Явление комптоновского рассеяния преобладает при взаимодействии γ -излучения с энергией $0,5 < E_\gamma < 2,5 \text{ МэВ}$ с легкими веществами. В результате рассеяния γ -квант, сталкиваясь с электроном, теряет часть своей энергии и изменяет направление движения.

Явление комптоновского рассеяния на электроне количественно характеризуется эффективным сечением взаимодействия комптоновского рассеяния σ_κ (*коэффициентом рассеяния*). Величина коэффициента рассеяния (*микроскопическое сечение*) пропорциональна концентрации электронов

$$\sigma_\kappa(E) = Z \cdot \sigma_e(\beta),$$

где Z – порядковый номер элемента;

σ_e – коэффициент рассеяния, отнесенный к одному электрону.

Величина линейного коэффициента ослабления σ_a для легких элементов не зависит от Z и пропорциональна плотности вещества:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_e \cdot \rho \cdot N_A \cdot Z}{A},$$

где ρ – плотность поглощающего вещества;

N_A – число Авогадро;

A – атомный вес.

Если известна величина линейного коэффициента ослабления σ_a для одного из веществ, например, алюминия σ_{aAl} , которая приводится обычно в таблицах, то для любого элемента.

$$\sigma_a = \sigma_{aAl} \frac{\rho}{\rho_{Al}} \cdot \frac{A_{Al}}{A} \cdot \frac{Z}{Z_{Al}}.$$

Процесс фотоэффекта возникает при взаимодействии мягкого γ -излучения с тяжелыми веществами. В результате этого явления γ -квант поглощается (исчезает), а его энергия расходуется на отрыв и передачу

кинетической энергии одному из электронов атома. Энергия γ -кванта E_γ распределяется в соответствии с формулой

$$E_\gamma = E_0 + E_k ,$$

где E_0 – энергия, затрачиваемая на вырывание электрона из электронной оболочки;

E_k – кинетическая энергия электрона.

Чем больше E_0 , тем больше вероятность фотоэффекта.

Количественно фотоэффект характеризуется эффективным сечением взаимодействия σ_ϕ , который выражает долю γ -квантов, поглощаемых на единице пути в веществе, и выражается следующей формулой:

$$\sigma_\phi = a \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{2,8} Z^4 ,$$

где a – постоянная.

Полный коэффициент ослабления в данном веществе определяется формулой

$$\tau = \sigma_\phi \frac{\rho \cdot N_A}{A} .$$

Если известна величина линейного коэффициента ослабления для одного из веществ (например, для свинца), которая приводится обычно в таблицах, то для любого элемента

$$\sigma_a = \sigma_{aAl} \frac{\rho}{\rho_{Pb}} \cdot \frac{A_{Pb}}{A} \cdot \left(\frac{Z}{Z_{Pb}}\right)^4 .$$

Эффект образования пар наблюдается при энергии γ -квантов, превышающей суммарную энергию покоя электрона и позитрона (большей $1,02 \text{ МэВ}$), когда энергия достаточна для образования пары электрон-позитрон. Причем вероятность эффекта образования пар зависит от заряда ядра, т. е. образование пар электрон-позитрон может происходить при взаимодействии с тяжелыми веществами, однако процесс образования пар даже в тяжелых средах важен лишь при энергии γ -квантов более $2\text{--}3 \text{ МэВ}$. Поэтому в ядерной геофизике этим явлением пренебрегают.

Ослабление γ -излучения в веществе в целом характеризуется коэффициентом, учитывающим оба описанных выше явления, называемым линейным коэффициентом поглощения (ослабления):

$$\mu = \sigma_a + \tau.$$

Величину μ обычно выражают в см^{-1} .

Отношение линейного коэффициента ослабления к плотности вещества μ/ρ называется массовым коэффициентом ослабления γ -излучения.

Ослабление потока γ -квантов подчиняется определенным законам в зависимости от геометрии пучка: узкого или широкого.

В геометрии узкого пучка ослабление γ -излучения в веществе происходит по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot d),$$

где I и I_0 – интенсивность γ -излучения до и после поглощения;

μ – линейный коэффициент ослабления γ -излучения;

d – толщина поглощающего слоя.

Геометрию узкого пучка γ -излучения можно получить с помощью диафрагмы.

В геометрии широкого пучка ослабление γ -излучения в веществе пучка происходит по закону:

$$I = B \cdot I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot d),$$

где B – фактор накопления, учитывающий рассеянное излучение после прохождения γ -излучения через вещество.

Фактор накопления – это отношение плотности потока (числа квантов или дозы) рассеянного и первичного γ -излучения к плотности потока (числу квантов или дозе) первичного γ -излучения.

Различают энергетический фактор накопления B_E при регистрации плотности потока энергии излучения, числовой фактор (квантовый) накопления B_N при регистрации плотности потока γ -квантов и дозовый фактор накопления B_D при регистрации МЭД или ЭД.

Задание

Рассчитать изменение интенсивности узкого пучка γ -квантов с энергией E после прохождения через защитный экран, толщиной 1 см (варианты заданий даны в таблице 2). Значение линейного коэффициента ослаб-

ления соответствующего материала, энергию γ -излучения и материал, из которого состоит защитный экран, взять из таблицы 3. Расчеты выполнить для разных толщин защитного экрана (1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 см).

Построить график изменения интенсивности γ -излучения от толщины экрана.

Рассчитать, при какой толщине защитного экрана интенсивность узкого пучка γ -квантов уменьшится в 2 и 10 раз.

Таблица 2 – Варианты заданий

№ варианта	E_γ , МэВ	Материал экрана	№ варианта	E_γ , МэВ	Материал экрана
1	3	Свинец	16	1,5	Свинец
2	1	Алюминий	17	0,5	Алюминий
3	2	Железо	18	0,8	Железо
4	1	Бетон	19	0,6	Бетон
5	2	Вода	20	0,3	Вода
6	2	Свинец	21	2,75	Свинец
7	1,5	Алюминий	22	0,15	Алюминий
8	1	Железо	23	2,5	Железо
9	2	Бетон	24	1,25	Бетон
10	1	Вода	25	1,4	Вода
11	1	Свинец	26	0,5	Свинец
12	2	Алюминий	27	3	Алюминий
13	3	Железо	28	0,4	Железо
14	2,75	Бетон	29	0,1	Бетон
15	0,4	Вода	30	0.145	Вода

Таблица 3 – Значения линейного μ коэффициента ослабления узкого пучка γ -излучения для различных материалов в зависимости от энергии излучения E_γ

E_γ , МэВ	Значение линейного коэффициента μ , см^{-1}					
	Вода $\rho = 1\,000$ кг/м^3	Воздух $\rho = 1,29$ кг/м^3	Алюминий $\rho = 2\,700$ кг/м^3	Бетон $\rho = 2\,800$ кг/м^3	Железо $\rho = 7\,860$ кг/м^3	Свинец $\rho = 11\,340$ кг/м^3
1	2	3	4	5	6	7
0,01	4,99	6,22	699	60,3	1330	1390
0,015	1,50	1,87	20,2	18,4	440	1210
0,02	0,707	0,876	8,61	7,87	196	939

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
0,03	0,325	0 393	2,70	2,48	61,3	323
0,04	0,238	0,283	1,33	1,22	26,8	151
0,05	0,207	0,243	0,861	0,784	14,2	82,1
0,06	0,192	0,224	0656	0,596	8,72	50,8
0,08	0,175	0,204	0,489	0,442	4,22	23,6
0,1	0,165	0,193	0,424	0,382	2,60	60,3
0,145	0,150	0,174	0,362	0,320	1,51	24,6
0,15	0,148	0,172	0,356	0,317	1,39	21,8
0,2	0,136	0,158	0,321	0,285	1,06	10,7
0,279	0,121	0,141	0,286	0,253	0,865	4,65
0,3	0,118	0,137	0,278	0,246	0,833	4,25
0,4	0,106	0,123	0,248	0,219	0,717	2,44
0,412	0,105	0,122	0,245	0,216	0,707	2,32
0,5	0,0966	0,112	0,226	0,200	0,646	1,70
0,6	0,0894	0,104	0,209	0,185	0,595	1,33
0,662	0,0857	0,0995	0,201	0,177	0,570	1,18
0,8	0,0786	0,0914	0,184	0,163	0,520	0,952
1,0	0,0706	0,0821	0,165	0,146	0,467	0,771
1,25	0,0631	0,0734	0,148	0,131	0,422	0,658
1,5	0,0575	0,0668	0,135	0,119	0,381	0,577
2,0	0 0494	0,0574	0,116	0,103	0,333	0,508
2,75	0,0410	0,0472	0,0994	0,0874	0,291	0,476
3,0	0,0397	0,0463	0,0958	0,0837	0,284	0,468
4,0	0,0340	0,0398	0,0837	0,0734	0,260	0,472
5,0	0,0303	0,0356	0,0764	0,0665	0,248	0,481
6,0	0,0277	0,0326	0,0718	0,0619	0,240	0,494
8,0	0,0243	0,0288	0,0656	0,0561	0,234	0,520
10	0,0222	0,0264	0,0626	0,0529	0,234	0,550

Контрольные вопросы

- 1 Назовите и опишите основные процессы взаимодействия гамма-излучения с веществом.
- 2 Какая величина определяет вероятность того или иного вида взаимодействия?
- 3 Что такое линейный и массовый коэффициенты ослабления?
- 4 Раскройте смысл понятий «узкий пучок» и «широкий пучок».
- 5 Что такое фактор накопления, и какие разновидности его применяются на практике?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 4

РАЗДЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА И ТОРОНА ПО ДАННЫМ ПРОФИЛЬНОЙ ЭМАНАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

Сущность эманационной съемки состоит в отборе на точке наблюдения пробы подпочвенного воздуха и последующем измерении в ней удельной активности радиоактивных газов (эманаций).

Для определения суммарной удельной активности эманаций (радона и торона) берут отсчет по шкале стрелочного индикатора эманометра через интервал времени, равный $10 \div 20$ с после введения подпочвенного воздуха в измерительную камеру. За это время в камере оседает пыль, попадающая вместе с подпочвенным воздухом, и распадается актион. Суммарная удельная активность эманации будет равна:

$$N = j(n_1 - n_{\phi}),$$

где n_{ϕ} и n_1 – показания эманометра при измерении фона и гамма-излучения подпочвенного воздуха при экспозиции t_1 ;

j – чувствительность эманометра, Бк/л на одно деление шкалы.

Для раздельного определения удельной активности радона N_{Ra} и торона N_{Th} необходимо в некоторых точках профиля выполнить два отсчета эманометра; первый отсчет n_1 берут сразу после введения подпочвенного воздуха в эманационную камеру, второй отсчет n_2 через интервал времени равный $90 \div 120$ с после введения подпочвенного воздуха в камеру. За это время вклад торона в результаты измерений уменьшится, а за счет радона увеличивается в связи с образованием элементов RaA, RaB и RaC с высокой радиоактивностью.

Значения N_{Ra} и N_{Th} рассчитываются по формулам

$$N_{Ra} = j[a(n_2 - n_{\phi}) - b(n_1 - n_{\phi})],$$

$$N_{Th} = j[c(n_2 - n_{\phi}) - d(n_1 - n_{\phi})],$$

где a, b, c, d – коэффициенты, равные

$$a = k_1/A, \quad b = k_2/A, \quad c = m_2/A, \quad d = m_1/A,$$

$$A = m_2 k_1 - m_1 k_2.$$

Коэффициенты m_1 и m_2 характеризуют нарастание измеряемого эффекта за счет образования продуктов распада радона в момент времени t_1 и t_2 после введения эманации в камеру. Значения коэффициентов для разных t представлены в таблице 4.

При наличии в измерительной камере только торона, уменьшение показаний прибора определяется коэффициентами

$$k_1 = \ell^{-\lambda_{Th} t_1}, \quad k_2 = \ell^{-\lambda_{Th} t_2},$$

где λ_{Th} – константа распада торона, равная $1,27 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Таблица 4 – Коэффициенты нарастания m в ионизационной (ион) и сцинтилляционной (сц) камерах

Интервал времени прошедший с момента ввода Rn; мин	Значения m для разной продолжительности t (мин) введения Rn в камеру									
	0		3		6		10		15	
	ион	сц	ион	сц	ион	сц	ион	сц	ион	сц
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,11	1,19	1,06	1,09	1,03	1,04	1,01	1,02	1,00	1,01
2	1,20	1,36	1,11	1,17	1,05	1,07	1,02	1,03	1,01	1,01
5	1,36	1,69	1,18	1,33	1,09	1,15	1,04	1,06	1,02	1,02
10	1,48	1,95	1,25	1,46	1,12	1,20	1,06	1,09	1,04	1,05
20	1,56	2,08	1,31	1,55	1,17	1,26	1,09	1,13	1,07	1,08
30	1,60	2,17	1,35	1,62	1,20	1,31	1,13	1,18	1,10	1,14
40	1,66	2,27	1,40	1,69	1,24	1,37	1,16	1,25	1,12	1,19
60	1,75	2,47	1,47	1,83	1,30	1,49	1,22	1,35	1,18	1,29
90	1,86	2,74	1,56	2,03	1,38	1,63	1,29	1,46	1,26	1,38
120	1,93	2,83	1,61	2,08	1,43	1,69	1,33	1,49	1,28	1,41
180	1,96	2,88	1,64	2,11	1,45	1,70	1,34	1,51	1,30	1,43
240	1,96	2,91	1,64	2,12	1,45	1,71	1,34	1,52	1,30	1,44

Задание

1 По результатам эманационных измерений (таблица 5) сцинтилляционным эманометром вычислить коэффициенты a , b , c , d , k , b и составить рабочие уравнения для расчета N_{Ra} и N_{Th} .

Таблица 5 – Варианты заданий к практической работе 4

№ пункта	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5		Вариант 6		Вариант 7		Вариант 8		Вариант 9		Вариант 10	
	$n_1 (l_1=20 c)$	$n_2 (l_2=90 c)$	$n_1 (l_1=20 c)$	$n_2 (l_2=120 c)$	$n_1 (l_1=20 c)$	$n_2 (l_2=90 c)$	$n_1 (l_1=20 c)$	$n_2 (l_2=90 c)$	$n_1 (l_1=10 c)$	$n_2 (l_2=90 c)$	$n_1 (l_1=20 c)$	$n_2 (l_2=120 c)$	$n_1 (l_1=10 c)$	$n_2 (l_2=90 c)$	$n_1 (l_1=10 c)$	$n_2 (l_2=120 c)$	$n_1 (l_1=20 c)$	$n_2 (l_2=90 c)$	$n_1 (l_1=10 c)$	$n_2 (l_2=120 c)$
1	24	20	34		28	16	31		46		31		27		31	25	25		17	14
2	27		28	16	30		33	30	40		34	30	29		35		24	20	23	
3	31		26		32		38		34	17	40		33	30	41		20		27	22
4	35	31	30	20	24	20	40		43		39	31	27		47	20	17		25	
5	40		36		20		35		39	16	37		25	21	53	16	15		21	
6	48		40		21	25	32	28	37		33		22		49		20		17	14
7	53	44	44	24	27		28		40		28	20	20		44	33	27		14	
8	41		41		31		27	24	38		25	20	24		40		30	28	18	
9	39		35		38		26		48		26		29	27	33		35		20	17
10	35	33	30	21	42	33	28		50	22	30		33		27		40		25	
11	27		38		41		30		56		31		40		29	41	33	29	31	
12	29		41		39		25	21	51		37	35	44		33		27		37	33
13	33	27	49		35	29	21		49		40		47	39	40		27		33	
14	24		56		31		19	17	45	19	43		49		31		28	25	31	
15	19	20	62		39		23		41		48	44	43		26	34	30		36	31
16	17		54	32	27	20	27	22	45	17	50		39	31	33		33		40	
17	26		49		25		25		48		47	40	33		25		40	33	43	
18	30		42		19		20		47		42		28		29	20	27		37	33
19	32	29	31	19	20	19	20		50		35		25	22	24		24	20	35	
20	37		40		23		23	20	47	20	32	31	22		20	24	20		30	25

2 В точках с двойными замерами отдельно определить удельную активность радона и торона. Результаты расчетов записать в виде таблицы. Чувствительность эманометра взять равной 0,26 Бк/л на одно деление шкалы, а значение фона $n_{\text{ф}}$ принять равным 2 имп/с. Время введения Rn в камеру принять равным 6 мин.

3 Построить график удельной активности эманации по профилю.

Контрольные вопросы

1 В чем состоит принцип раздельного определения концентраций радона и торона в почвенном воздухе?

2 Каковы периоды полураспада радона, торона и актиона?

3 В чем состоит сущность полевой эманационной съемки?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 5 ГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДИАГРАММ ИНТЕГРАЛЬНОГО ГАММА-КАРОТАЖА

Количественная интерпретация каротажных γ -аномалий состоит в определении мощности рудных интервалов и концентрации в них урана.

Для определения границ (мощности) рудного интервала применяют способы $Z_{1/2}$, $(1/2)J_{\text{max}}$, Z_0 и заданной интенсивности $J_{\text{зад}}$. Выбор способа зависит от характера границы между рудным телом и вмещающими породами.

Для выбора необходимого способа определения мощности (границ) рудных интервалов нужно измерить проекцию на ось глубин «прямолинейного» участка крыла графика γ -аномалии, продолженного до пересечения с уровнем фонового излучения от вмещающих пород (отрезок $b_{\text{ф}}$ на рисунке 2), и сравнить ее с величиной $b_{\text{г}}$, найденной по номограмме (Приложение А).

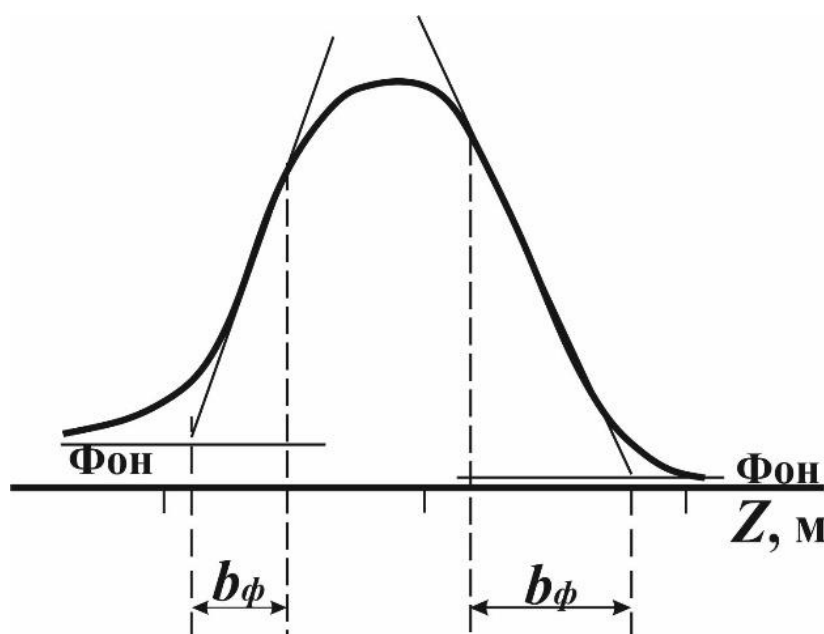


Рисунок 2 – Выбор способа определения границ рудного интервала

Для случаев, когда угол встречи скважины с рудным телом $\alpha > 65^\circ$ (при $b_\phi < 2b_T$), границы рудного интервала можно определить способом $Z_{1/2}$ или $0,5J_{max}$, а если $b_\phi > 2b_T$, то границу определяют способом $J_{зад}$. Если $\alpha < 65^\circ$, то b_ϕ сначала умножают на $\sin\alpha$, а потом полученное значение сравнивают с b_T .

Способ $Z_{1/2}$ применяют для интерпретации диаграмм гамма-каротажа, соответствующих интервалам с резким переходом во вмещающие породы, т. е. для рудных тел небольшой мощности ($h < 50$ см) (рисунок 3). В данном способе сначала необходимо измерить ширину аномалии $Z_{1/2}$ как расстояние между точками, в которых интенсивность излучения составляет половину от максимального значения:

$$J = 0,5J_{max} + J_\phi,$$

где J_{max} – разность между максимальной интенсивностью гамма-излучения и интенсивностью излучения фона J_ϕ во вмещающих породах.

Затем, если $\alpha \geq 65^\circ$, то истинную мощность h для данного $Z_{1/2}$ находят по номограмме (Приложение Б). Если же $\alpha < 65^\circ$, то пользуются той же номограммой, но вместо $Z_{1/2}$ берут величину $Z_{1/2}\sin\alpha$. Видимая мощность по стволу скважины $h_{вид}$ в этом случае равна $h_{вид} = h/\sin\alpha$.

Для нахождения границ рудного интервала необходимо отложить отрезки, равные

$$(Z_{1/2} - h_{вид})/2,$$

внутри аномалии от проекций на ось глубин точек, в которых интенсивность гамма-излучения равна

$$J = 0,5J_{max} + J_{\Phi}.$$

Если аномалия не имеет четкого максимума, её ширину определяют по расстоянию между точками, в которых прямолинейные участки крыльев делятся пополам.

Способ $0,5J_{max}$ также применяют для интерпретации диаграмм, соответствующих рудным интервалам с резким переходом во вмещающие породы, но уже для рудных тел с мощностью $h > 50$ см (рисунок 4). В этом способе границы рудного интервала находят по точкам на оси глубин, в которых интенсивность излучения равна

$$J = (1/2)J_{max} + J_{\Phi}.$$

Если аномалия вблизи границ не имеет четких максимумов, то положение границ определяют по проекциям на ось глубин точек, в которых «прямолинейные» участки крыльев графика γ -аномалии делятся пополам (точки A и B на рисунке 4).

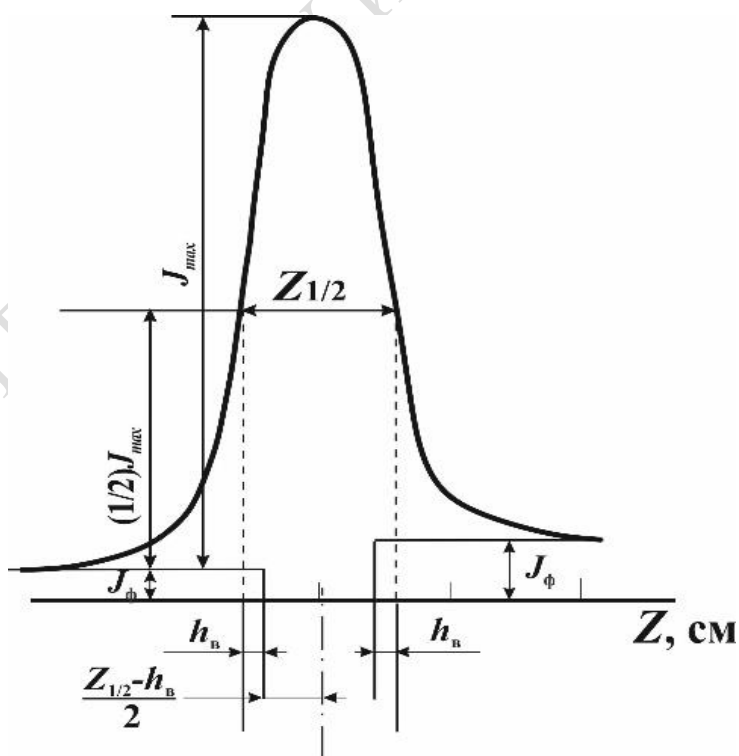


Рисунок 3 – Определение границ рудного интервала (способ $Z_{1/2}$)

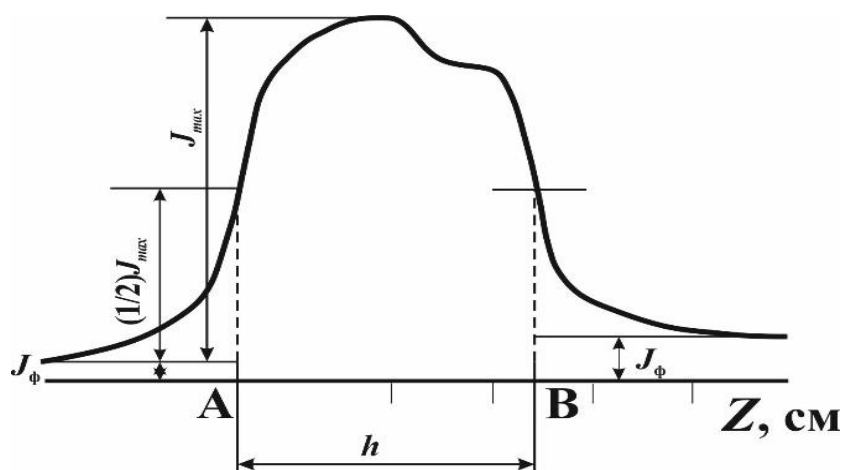


Рисунок 4 – Определение границ рудного интервала (способ $(1/2)J_{max}$)

Способ Z_0 применяют для интерпретации аномалий со многими максимумами, соответствующих нескольким рудным пропласткам. В этом способе на каротажной диаграмме измеряют расстояние между проекциями на ось глубин точек А и В, в которых пересекаются касательные к прямолинейным участкам крыльев аномалии и уровни фона (рисунок 5). Затем по номограмме (Приложение В) находим величину $2l_0$ как функцию от диаметра скважины $2r_0$. Чтобы определить границы рудного тела, нужно от точек А и В отложить внутрь аномалии отрезки l_0 при $\alpha \geq 65^\circ$ или $l_0/\sin\alpha$ при $\alpha < 65^\circ$. Концы этих отрезков соответствуют границам крайних пропластков рудного тела.

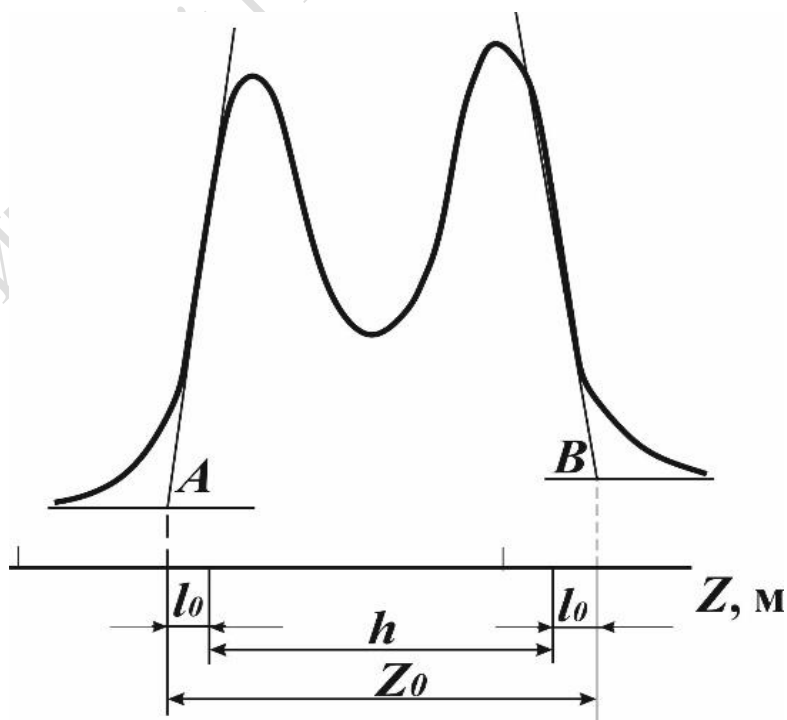


Рисунок 5 – Определение границ рудного интервала (способ Z_0)

Способ $J_{\text{зад}}$ применяют для определения границ рудных интервалов с непрерывно и постепенно меняющейся массовой долей урана по мощности рудного интервала. Границы рудных интервалов по этому способу находят по положению на оси глубин проекций точек, в которых частота импульсов равна заданной (рисунок 6).

Заданную частоту импульсов $J_{\text{зад}}$ рассчитывают по формуле

$$J_{\text{зад}} = K_0 \cdot C_{\text{зад}} \cdot K_{\text{р.р}} \cdot \Pi_{\text{б.р}} \cdot \Pi_{\text{обс}} \cdot 100,$$

где K_0 – пересчетный коэффициент, численно равный интенсивности гамма-излучения внутри бесконечной однородной среды с концентрацией равновесного урана 0,01 %, мкр/ч на 0,01 % U;

$K_{\text{р.р.}}$ – коэффициент радиоактивного равновесия;

$C_{\text{зад}}$ – бортовая массовая доля урана в кондиционной руде;

$\Pi_{\text{б.р.}}$ – поправка на поглощение гамма-излучения в буровом растворе;

$\Pi_{\text{обс.}}$ – поправка на поглощение гамма-излучения в обсадных трубах.

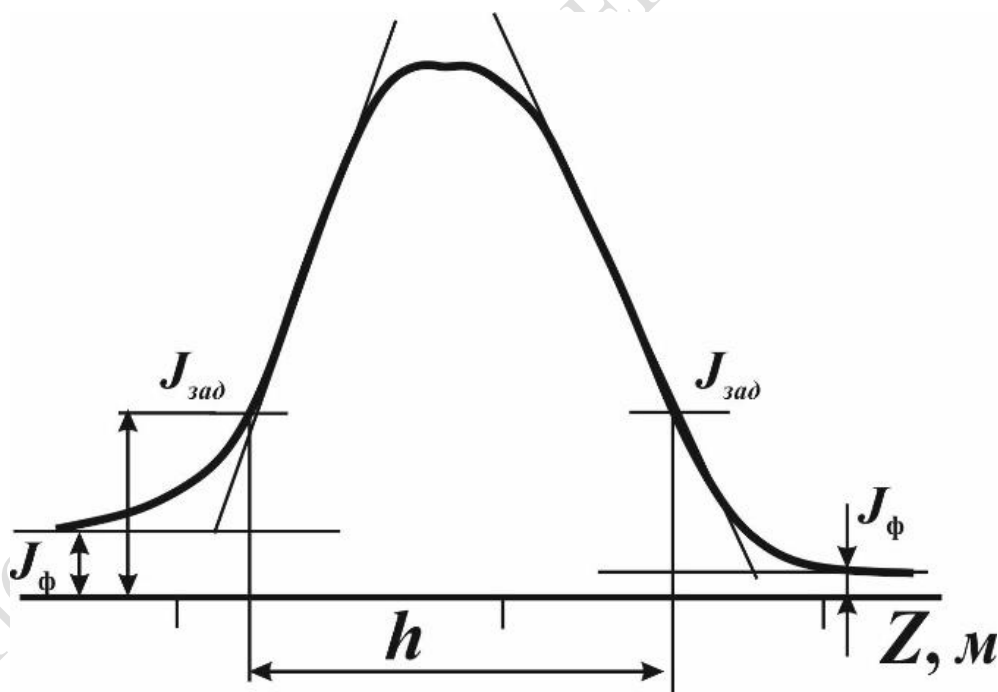


Рисунок 6 – Определение границ рудного интервала (способ $J_{\text{зад}}$)

Величина $\Pi_{\text{б.р.}}$ зависит от эквивалентной толщины слоя бурового раствора:

$$T_{\text{экв}} = \rho_0(r_0 - r),$$

где ρ_0 – плотность бурового раствора, г/см³;

r_0 и r – соответственно радиус скважины и радиус зонда.

Величина $\Pi_{\text{обс.}}$ зависит от толщины обсадных труб d .

Эти параметры приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Значения $\Pi_{\text{б.р.}}$ и $\Pi_{\text{обс.}}$ в зависимости от $T_{\text{экв.}}$ и d .

$T_{\text{экв.}},$ г/см ³	$d,$ мм	$\Pi_{\text{б.р.}}$	$\Pi_{\text{обс.}}$	$T_{\text{экв.}},$ г/см ³	$d,$ мм	$\Pi_{\text{б.р.}}$	$\Pi_{\text{обс.}}$	$T_{\text{экв.}},$ г/см ³	$d,$ мм	$\Pi_{\text{б.р.}}$	$\Pi_{\text{обс.}}$
0,0	0	1	1	3,5	3,5	0,89	0,88	7,0	7	0,81	0,78
0,5	0,5	0,98	0,98	4,0	4	0,88	0,87	7,5	7,5	0,80	0,76
1,0	1	0,96	0,96	4,5	4,5	0,86	0,85	8,0	8	0,80	0,75
1,5	1,5	0,94	0,94	5,0	5	0,85	0,84	8,5	8,5	0,79	0,74
2,0	2	0,93	0,93	5,5	5,5	0,84	0,82	9,0	9	0,78	0,72
2,5	2,5	0,91	0,91	6,0	6	0,83	0,80	10,0	10	0,76	0,70
3,0	3	0,90	0,90	6,5	6,5	0,82	0,79	12,0	12	0,74	0,67

Определение массовой доли урана. Для определения массовой доли урана в рудном интервале используют ее зависимость от площади γ -аномалии. Расчет (в сотых долях % U) ведут по формуле

$$q_U = \frac{0,01S}{h \cdot K_0 \cdot C_{\text{зад}} \cdot K_{\text{р.р}} \cdot \Pi_{\text{б.р}} \cdot \Pi_{\text{обс}}},$$

где S – площадь γ -аномалии, см · пА/кГ;

h – мощность рудного интервала, см.

Контур, в пределах которого измеряют площадь γ -аномалии, устанавливают различным образом в зависимости от выбранного способа определения границ рудного тела. Если границы определяют способом $(1/2)J_{\text{max}}$, $Z_{1/2}$ или Z_0 , то для оконтуривания γ -аномалии со стороны кровли и подошвы рудного интервала параллельно оси глубин проводят линии, соответствующие уровню фонового излучения от вмещающих пород до пересечения с перпендикулярами к оси глубин из точек соответствующих границам рудного интервала (рисунок 7 а, б и в).

Если границы рудного интервала определены способом $J_{\text{зад}}$, то площадь γ -аномалии оконтуривают графиком гамма-каротажа, осью глубин и перпендикулярам к ней из точек, соответствующих границам рудного интервала (рисунок 7 г).

Площадь γ -аномалии измеряют планиметром или вычисляют методом трапеций. Суть метода трапеций сводится к разбиению аномалии через

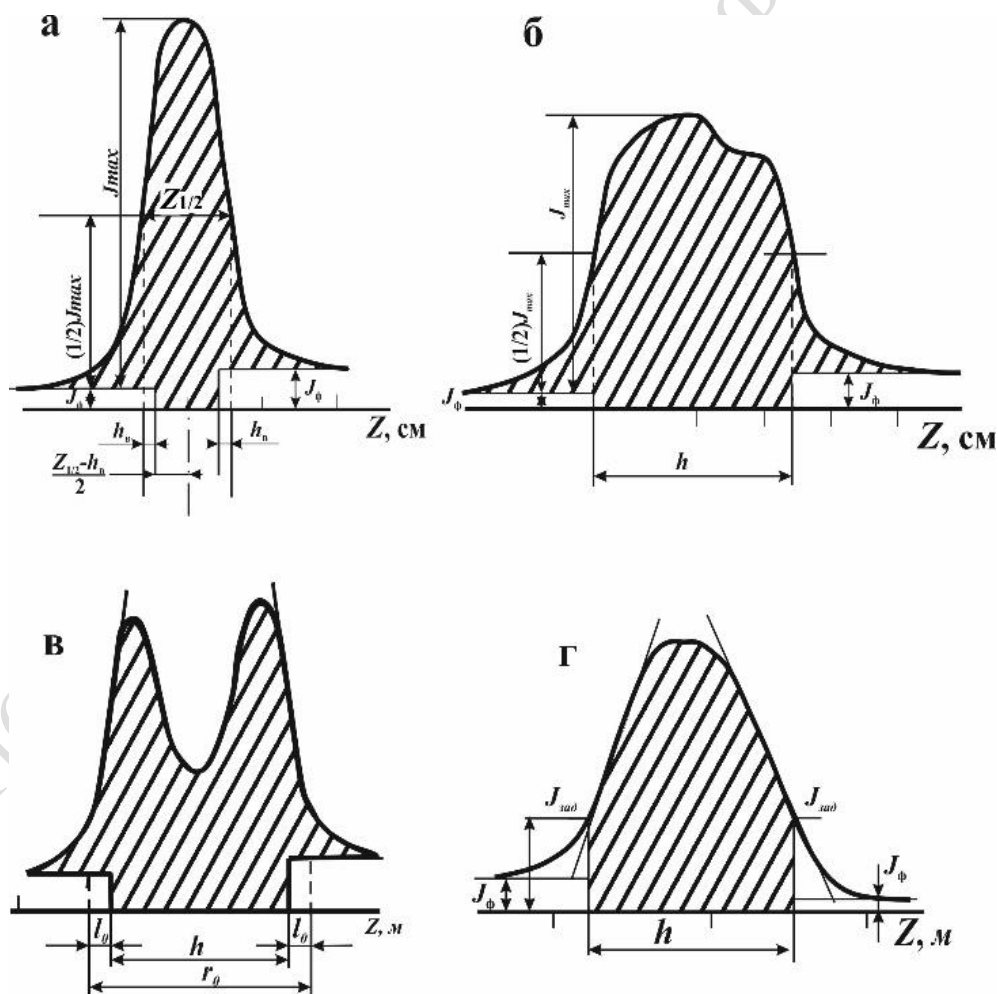
равные интервалы (шаг квантования) прямыми линиями, которые перпендикулярны оси глубин. Затем отрезки этих линий внутри контура аномалии измеряют в миллиметрах l_i и суммируют $\sum l_i$. С учетом масштаба по оси глубин $M_{\text{глуб.}}$ по формуле

$$S' = \frac{\sum l_i}{M_{\text{глуб.}}}$$

рассчитываем площадь в сантиметрах квадратных, а затем с учетом масштаба по осям глубин $M_{\text{глуб.}}$ и масштаба интенсивности излучения $M_{\text{инт.}}$ по формуле

$$S = S' M_{\text{глуб.}} M_{\text{инт.}}$$

пересчитывают в единицы $\text{см} \cdot \text{мкР/ч}$.



а – способ $Z_{1/2}$, б – способ $(1/2)J_{\text{max}}$, в – способ Z_0 , г – способ $J_{\text{зад}}$

Рисунок 7 – Оконтурирование площади γ -аномалии

Задание

Выполнить количественную интерпретацию аномалии гамма-каротажа графическим способом:

- получить у преподавателя фрагмент каротажной диаграммы;
- скопировать на кальку участок с гамма-аномалией, ось глубин и ось интенсивности;
- выбрать способ определения границ рудного интервала и определить границы рудного интервала;
- вычислить площадь рудного интервала;
- определить массовую долю урана в рудном пласте (величина пересчетного коэффициента, значения плотности бурового раствора, диаметр скважины, диаметр скважинного прибора и толщина обсадных труб указаны на каротажной диаграмме).

Контрольные вопросы

- 1 Как выбирается способ определения границ рудного пласта?
- 2 В чем суть принципа определения мощности пласта способом Z_0 ?
- 3 Опишите сущность определения мощности пласта способом $J_{\text{зад}}$?
- 4 В чем суть принципа определения мощности пласта способом $(1/2)J_{\text{max}}$?

ЛИТЕРАТУРА

1 Ибрагимов, Ш. З. Лабораторные работы по ядерной геофизике : учебно-методическое пособие / Ш. З. Ибрагимов. – Казань : Казанский университет, 2014. – 80 с.

2 Новиков, Г. Ф. Радиометрическая разведка : учебник для вузов / Г. Ф. Новиков. – Л. : Недра, 1989. – 418 с.

3 Пруткин, М. И. Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу / М. И. Пруткин, В. Л. Шишкин. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РУДНОГО ПЛАСТА

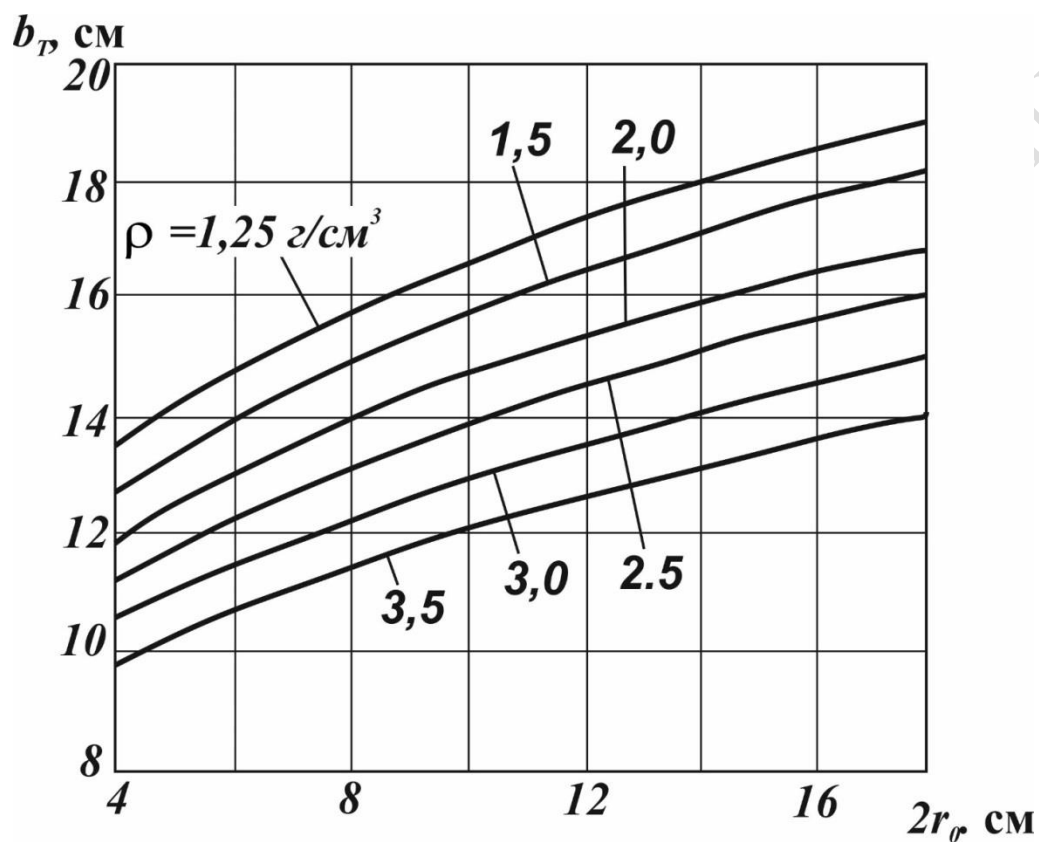


Рисунок А1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ РУДНОГО ИНТЕРВАЛА СПОСОБОМ $Z_{1/2}$

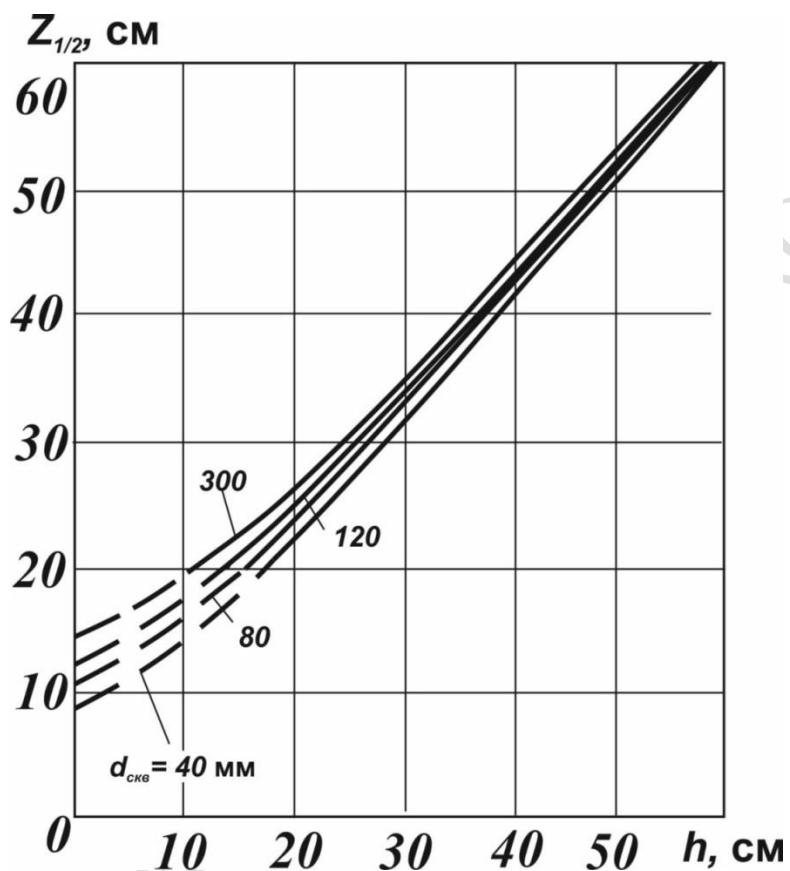


Рисунок Б1

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ $2L_0$ В СПОСОБЕ Z_0

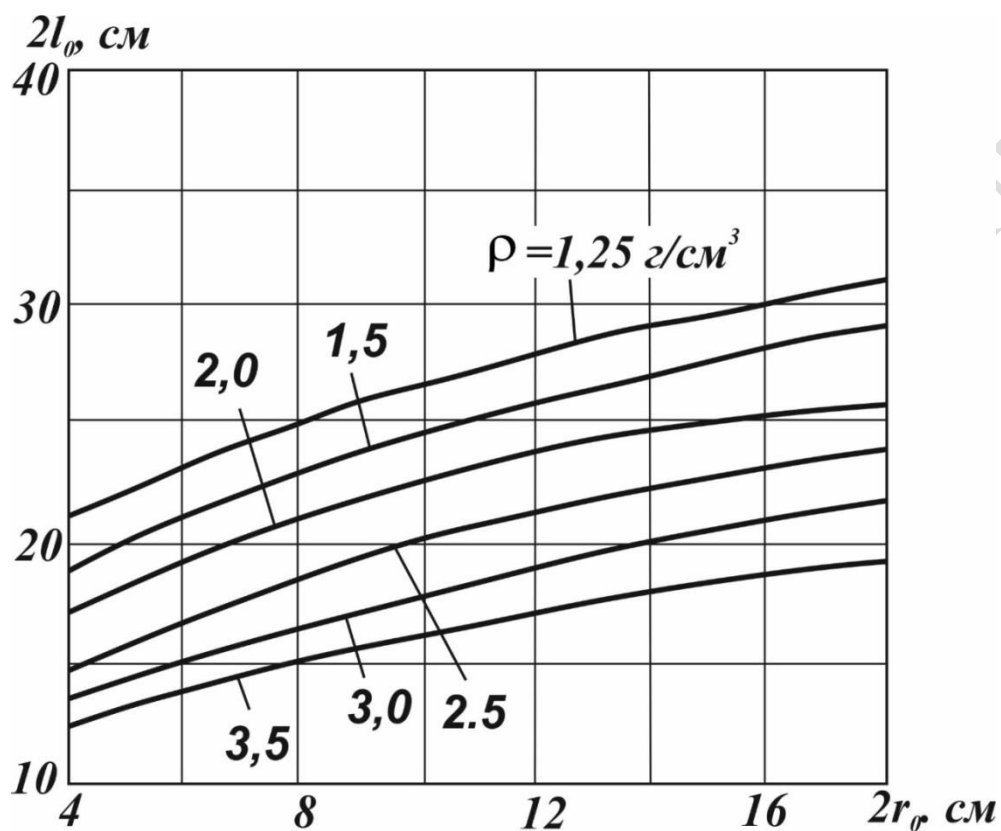


Рисунок В1

Производственно-практическое издание

**Верутин Михаил Григорьевич,
Кобрусева Ольга Николаевна**

ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ: ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Практическое пособие

Редактор В. И. Шкредова
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 08.07.2021. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,1. Уч.-изд. л. 2,3.

Тираж 25 экз. Заказ 407.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017 .

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.

Ул. Советская, 104, 246028, Гомель