

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**М. Г. ВЕРУТИН, О. Н. КОБРУСЕВА**

**ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ:  
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ**

Практическое руководство

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,  
канд. геол.-минерал. наук А. П. Гусев

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

**Верутин, М. Г.**

В31 Ядерно-геофизические методы исследований: ядерно-физические  
методы : практическое руководство / М. Г. Верутин , О. Н. Кобрусева ;  
Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины,  
2021. – 40 с.

ISBN 978-985-577-777-0

В практическом руководстве рассматриваются методы ядерной геофизики,  
проводимые в горных выработках (гамма-опробование), а также ядерно-  
физические методы исследования горных пород (гамма-гамма-методы,  
нейтронные методы), проводимые в горных выработках (шурфах, скважи-  
нах и т. п.).

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

УДК 550.832.5(076)  
ББК 26.347.311я73

**ISBN 978-985-577-777-0**

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

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
1 Гамма-каротаж.....	5
1.1 Сущность гамма-каротажа.....	5
1.2 Методика проведения гамма-каротажа.....	8
1.3 Обработка и интерпретация результатов гамма-каротажа.....	9
1.4 Графический способ интерпретации.....	9
2 Радиометрическое опробование.....	15
2.1 Принцип гамма-опробования.....	15
2.2 Методика проведения гамма-опробования.....	19
2.3 Обработка и интерпретация данных гамма-опробования.....	20
3 Ядерно-физические методы.....	22
3.1 Классификация методов.....	22
3.2 Источники $\gamma$ -излучения.....	23
3.3 Гамма-нейтронный (фотонейтронный) метод (ГНМ).....	25
3.4 Гамма-гамма-метод (ГГМ).....	27
4 Нейтронные методы.....	29
4.1 Источники нейтронов.....	29
4.2 Нейтрон-нейтронные методы (ННМ).....	30
4.3 Нейтронный гамма-метод (НГМ).....	32
4.4 Нейтронный активационный метод (НАМ).....	32
5 Техника безопасности при проведении ядерно-геофизических исследований.....	34
5.1 Источники радиоактивного облучения и их воздействие на человека.....	34
5.2 Нормы радиационной безопасности.....	36
5.3 Основные правила работы с радиоактивными источниками.....	37
5.4 Радиационная безопасность при работе с радиоактивными рудами и радиевыми источниками.....	38
Литература.....	40

## ПРЕДИСЛОВИЕ

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 естественном залегании. Этим и определяется необходимость и актуальность изучения дисциплины «Ядерно-геофизические методы исследований».

В практическом руководстве рассматриваются методы ядерной геофизики, проводимые в горных выработках (гамма-опробование), ядерно-физические методы исследования горных пород (гамма-гамма-методы, нейтронные методы), проводимые в горных выработках (шурфах, скважинах и т. п.); а также нормы радиационной безопасности и правила работы с радиоактивными источниками, особенности техники безопасности при проведении ядерно-геофизических исследований.

Издание будет способствовать студентам в изучении теоретических основ ядерно-физических методов, в освоении методики проведения полевых и скважинных исследований, интерпретации полученных данных и в конечном итоге решении геологических и технологических задач.

Практическое руководство «Ядерно-геофизические методы исследований: ядерно-физические методы» по дисциплине «Ядерно-геофизические методы исследований» адресовано студентам 3 курса специальности 1 – 51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых» специализации 1 – 51 01 01 02 «Геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых».

# 1 ГАММА-КАРОТАЖ

- 1.1 Сущность гамма-каротажа.
- 1.2 Методика проведения гамма-каротажа.
- 1.3 Обработка и интерпретация результатов гамма-каротажа.
- 1.4 Графический способ интерпретации.

## 1.1 Сущность гамма-каротажа

Гамма-каротаж – это метод исследования горных пород, основанный на измерении характеристик  $\gamma$ -излучения естественных радионуклидов при перемещении детектора по стволу скважины.

Гамма-каротаж является основным методом опробования при поисках и разведке месторождений урана, используется для литологического расчленения геологических разрезов, для изучения физических свойств пород, а также при поисках и разведке месторождений некоторых нерадиоактивных элементов.

При количественной интерпретации результатов гамма-каротажа получают данные о мощности рудных тел  $h$  и о массовых долях  $C$  в них радионуклидов.

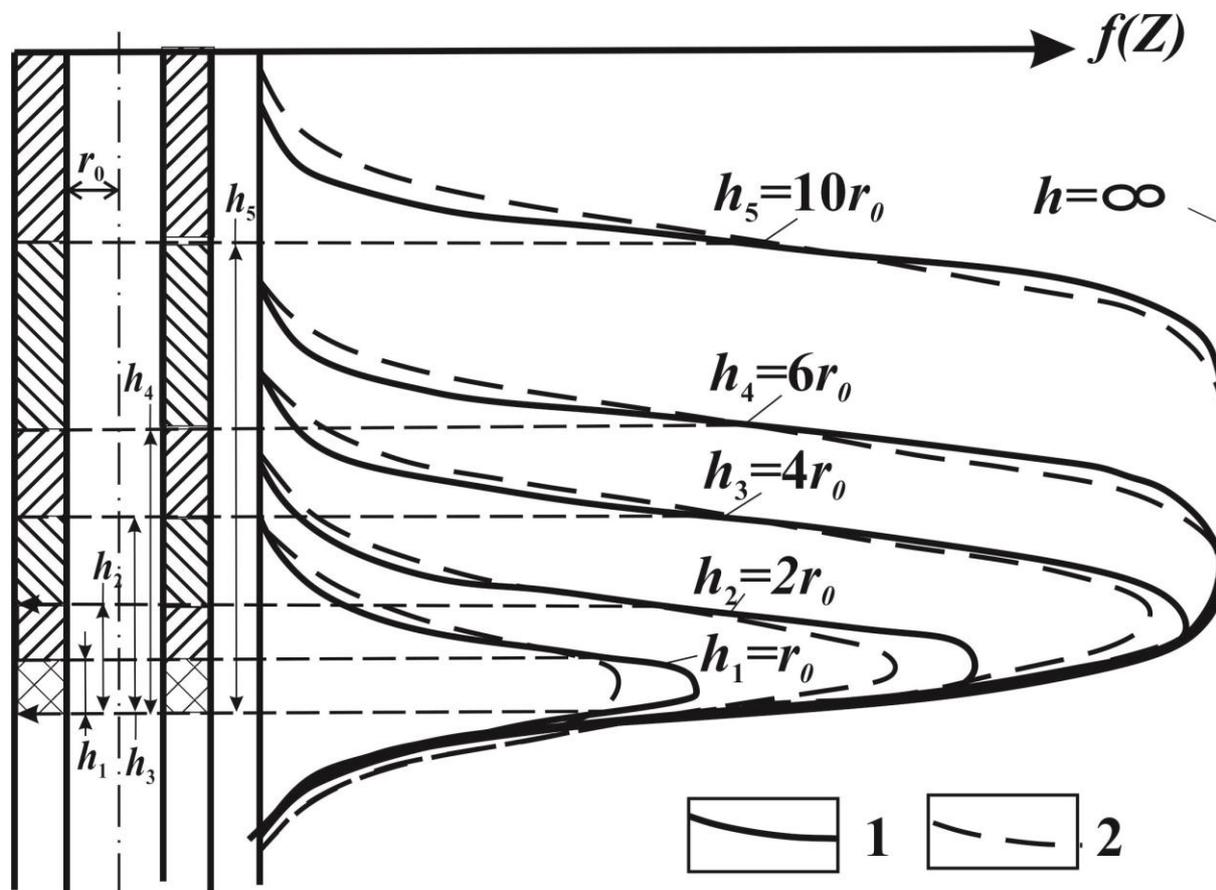
Основные соотношения, связывающие характеристики поля  $\gamma$ -излучения в геометрии гамма-каротажа с массовой долей урана, рассчитывают исходя из допущения, что источники  $\gamma$ -излучения распределены равномерно в направлении, перпендикулярном оси скважины.

Точные расчеты полей  $\gamma$ -излучения в условиях гамма-каротажа с учетом многократного рассеянного  $\gamma$ -излучения очень сложны. Удовлетворительные результаты получают при учете многократно рассеянного излучения путем введения эффективного линейного коэффициента ослабления  $\gamma$ -излучения  $\mu$ , постоянного для данной среды. Но и в этом случае получаем громоздкие аналитические выражения для расчета интенсивности излучения.

Показания гамма-каротажа зависят от радиоактивности, плотности и эффективного атомного номера горных пород вблизи радиометра, от диаметра и заполнения скважины, положения скважинного прибора по отношению к стенке скважины, спектра регистрируемого  $\gamma$ -излучения, а также от параметров аппаратуры.

Однако анализ формы кривых гамма-каротажа, полученных напротив пласта конечной мощности при разных диаметрах скважины, позволяет сделать следующие выводы.

1. У границы пласта имеется переходный участок с переменными значениями интенсивности  $\gamma$ -излучения протяженностью 40–50 см в обе стороны от границы (рисунок 1).



Индикатор: 1 – точечный, 2 – длиной  $2r_0$

Рисунок 1 – Форма кривых гамма-метода

При мощности пластов более 0,8–1 м на кривой имеется площадка практически постоянных максимальных значений интенсивности.

При  $h < 0,8–1$  м максимальная интенсивность в середине пласта заметно ниже, чем на самом деле, и уменьшается с уменьшением  $h$ . При других значениях  $r_0$  и форма кривой будет иной.

2. Форма кривых во всех случаях симметрична относительно середины пласта. Границы пласта при  $h > 0,8–1$  м (точнее при  $h > 8–10$ ) отмечаются на середине аномалии (на уровне  $1/2 \max$ ).

3. Симметричная форма кривых наблюдается лишь при измерениях по точкам, т. е. при неподвижном приборе или же при очень малой скорости его движения. При движении прибора дополнительно проявляется искажающее влияние инерции радиометра.

4. Влияние конечного размера детектора существенно лишь при мощности пласта, сравнимой с размерами детектора. Этим влиянием можно пренебречь, если длина счетчика не превышает 4 см при  $h = 10\text{--}20$  см и 10 см при  $h > 20$  см.

Расчеты показывают, что между площадью аномалии  $S$  и интенсивностью  $\gamma$ -излучения в бесконечном пласте  $I_\infty$  существует связь вида:

$$S = I_\infty \cdot h.$$

Поскольку величина  $I_\infty$  пропорциональна концентрации радиоактивного элемента  $C$ :

$$I_\infty = k_0 \cdot C,$$

где  $k_0$  – const, то  $S$  независимо от величины  $h$  оказывается пропорциональной так называемым линейным запасам, т. е. запасам элемента, приходящимся на единицу площади залежи (в плане). Это позволяет упростить интерпретацию диаграмм, особенно когда ее задачей является именно оценка запасов.

Площадь аномалии  $S$  считают в пределах замкнутого контура, ограниченного графиком аномалии.

Если величину  $C$  выражают в процентах урана, то

$$I_\infty = 100 \cdot k_0 \cdot C,$$

где  $k_0$  – пересчетный коэффициент, связывающий частоту импульсов с массовой долей радионуклидов в среде, он зависит от  $Z_{эф}$  среды и типа детектора. Пересчетные коэффициенты рассчитывают через чувствительность радиометра к радиевому источнику и выражают в единицах мощности экспозиционной дозы точечного радиевого источника на 0,01 % урана (тория) или на 1 % калия.

В скважине, заполненной жидкостью, увеличение диаметра скважины приводит к уменьшению показаний (в том числе и в пласте бесконечной мощности) вследствие поглощения  $\gamma$ -квантов в буровой жидкости. Однако в сухих скважинах, как показывает расчет, хотя и происходит небольшое изменение формы кривых, в частности занижение показаний в середине пласта, но площадь аномалии практически не меняется независимо от диаметра скважины при ее изменении от 40 до 150 мм.

## 1.2 Методика проведения гамма-каротажа

Измерения, при гамма-каротаже проводятся непрерывно с записью на ленте самописца или в отдельных точках. Скважинный прибор спускают в скважину со скоростью не более 2 000 м/ч, следя за изменением частоты импульсов. При обнаружении аномалии скорость спуска снижают до 200 м/ч фиксируют глубину залегания аномалии, а также определяют диапазон измеряемых частот импульсов. При подходе к забою скорость спуска уменьшают до 50 м/ч. Интенсивность  $\gamma$ -излучения измеряют при подъеме скважинного прибора. Уверенно записать аномалию можно при скорости не больше 500 м/ч с помощью приборов, у которых постоянная времени не превышает 1,5–2,5 с.

При гамма-каротаже с целью поисков или предварительной разведки месторождений, когда мощность дозы регистрируемого  $\gamma$ -излучения равновесных урановых руд равна  $4n \cdot A/\text{кг}$  и больше, следует проводить детализацию аномалии.

Детализацию проводят при скоростях, регламентированных инструкцией по гамма-каротажу, в соответствии с постоянной времени применяемого прибора. Если подъемное устройство не может обеспечить допустимую скорость каротажа, то детализацию аномалий проводят по точкам.

Запись диаграмм при каротаже скважин глубиной до 500 м, как правило, проводят в масштабе 1 : 500, а скважин глубже 1 000 м – в масштабе 1 : 1 000.

Запись диаграмм при детализации аномалий проводят в масштабе 1 : 50 или 1 : 20. Детализуемый участок (зона) должен быть привязан в кровле и подошве к ближайшим меткам, и при этом запись должна захватывать вмещающие породы – не менее чем по 1 м с каждой стороны.

Для получения правильных параметров рудного интервала важно записать аномалию без инерционных искажений, которые, изменяя форму кривой  $\gamma$ -аномалии, приводят к смещению границ рудного интервала, но не влияют на площадь аномалии.

Точечный способ регистрации применяют в случаях, когда непрерывная запись нецелесообразна по технико-экономическим соображениям, например при каротаже мелких скважин подземного бурения. Интервалы между точками измерений берут равными 0,5–1 м в нормальном поле, на аномальных участках – 0,1 м, а если заведомо известно, что мощность рудных интервалов меньше 0,3 м, то их уменьшают до 0,05 м.

### 1.3 Обработка и интерпретация результатов гамма-каротажа

Диаграммы гамма-метода исследования скважин оформляются в соответствии с утвержденными правилами: проводится разбивка глубин и оформление заголовка диаграмм, где должны быть указаны сведения о скважине (местонахождение, назначение, номер, глубина забоя, диаметр, заполнение), об использованном приборе (тип, номер, результаты эталонирования), о режимах измерения (скорость, постоянная интегрирующей ячейки, масштаб).

При интерпретации результатов гамма-каротажа выделяют пласты с повышенной интенсивностью  $\gamma$ -излучения, определяют их мощности  $h$  и оценивают содержание  $C$  радиоактивного элемента.

Интерпретация данных гамма-каротажа делится на *качественную* и *количественную*.

Качественная интерпретация сводится к расчленению геологического разреза по графику гамма-каротажа на литологические типы пород, различающиеся радиологическими характеристиками, и к выделению интервалов с высокой интенсивностью  $\gamma$ -излучения.

Количественную интерпретацию производят на интервалах с высокой интенсивностью  $\gamma$ -излучения ( $\gamma$ -аномалии) с целью определения их границ и массовой доли в них урана или тория.

Количественную интерпретацию выполняют графическим способом или с помощью ЭВМ.

### 1.4 Графический способ интерпретации

При графическом способе интерпретации определяют суммарную мощность рудного интервала и среднюю массовую долю в нем урана. Интерпретация основывается на использовании формы графика гамма-каротажа и так называемой *площади  $\gamma$ -аномалии*, за которую принимают площадь, ограниченную графиком гамма-каротажа и осью глубин.

**Определение мощности рудных интервалов.** Существует несколько способов определения мощности (границ) рудных интервалов, из которых необходимо выбрать подходящий.

Для выбора необходимого способа определения мощности (границ) рудных интервалов нужно измерить проекцию на ось глубин «прямолинейного» участка крыла графика  $\gamma$ -аномалии, продолженного до пересечения с уровнем фонового излучения от вмещающих пород (отрезок  $b_{\phi}$  на рисунке 2), и сравнить ее с величиной  $b_T$ , найденной на графике рисунка 3.

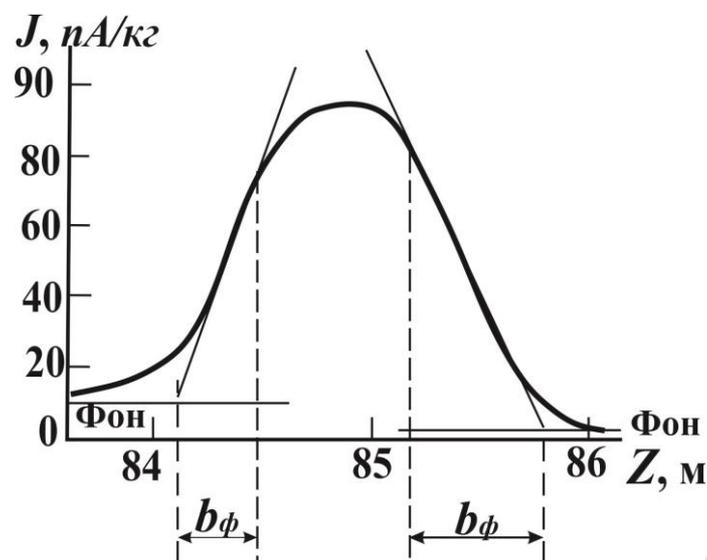


Рисунок 2 – Пример выбора способа определения границ рудных интервалов по форме графика  $\gamma$ -аномалии

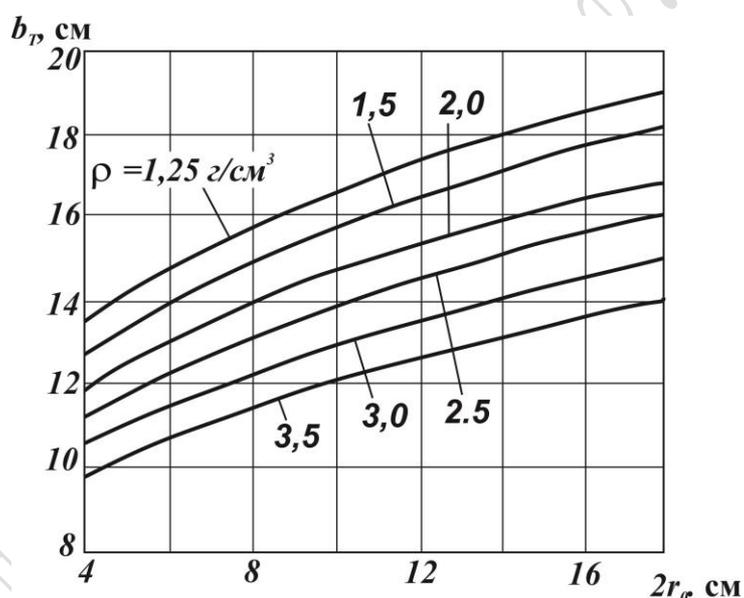


Рисунок 3 – Номограмма для выбора способа определения границ рудных интервалов при различной плотности

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  $(1/2)J_{max}$ , а если  $b_\phi > 2b_T$ , то границу определяют способом  $J_{зад}$ . Если  $\alpha < 65^\circ$ , то  $b_\phi$  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 (рисунок 4) в случае, когда расстояние между точками, в которых частота импульсов равна половине разности между максимальной и частотой им-

пульсов от вмещающих пород (отрезок  $CD$  на рисунке 4), меньше значения  $Z_{1/2}$ , определенного по графику рисунка 5.

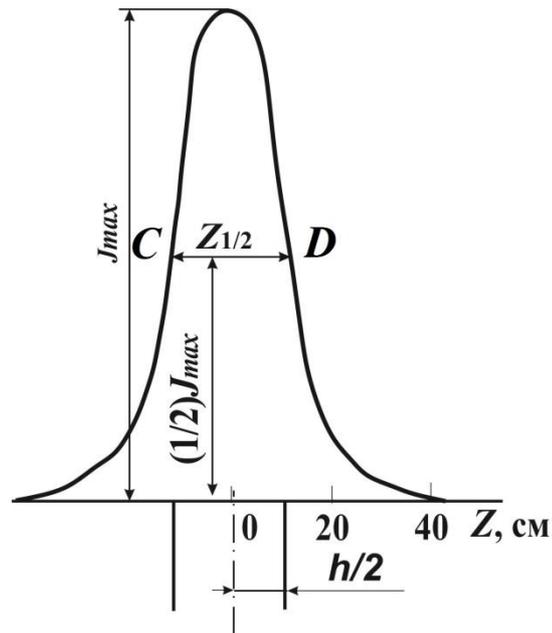


Рисунок 4 – Пример определения границ рудных интервалов способом  $Z_{1/2}$

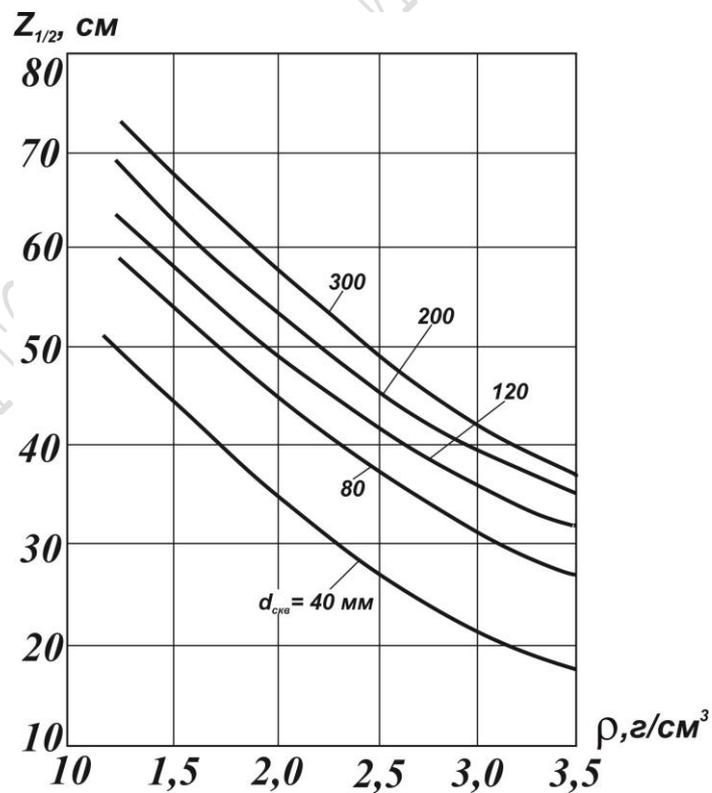


Рисунок 5 – Номограмма для определения области применения способа  $Z_{1/2}$  ( $d$  – диаметр скважины)

Для определения мощности рудного интервала измеряют ширину  $\gamma$ -аномалии, и если  $\alpha > 65^\circ$ , то истинную мощность  $h$  находят по кривым (рисунок 6). Если же  $\alpha < 65^\circ$ , то пользуются тем же графиком, но вместо  $Z_{1/2}$  берут величину  $Z_{1/2} \cdot \sin\alpha$ . Видимая мощность по стволу скважины  $h_{\text{вид}}$  в этом случае равна  $h_{\text{вид}} = h/\sin\alpha$ .

Для нахождения границ рудного интервала нужно из середины отрезка  $CD$  (рисунок 4) опустить перпендикуляр на ось глубин и отложить в обе стороны от него отрезки, равные  $0,5h/\sin\alpha$ . Концы этих отрезков (точки  $E$  и  $F$ ) будут соответствовать границам рудного интервала по стволу скважины. Если диаграмма  $\gamma$ -каротажа не имеет четкого максимума, то ее шириной считают расстояние между проекциями на ось глубин точек, в которых «прямолинейные» участки крыльев  $\gamma$ -аномалии делятся пополам.

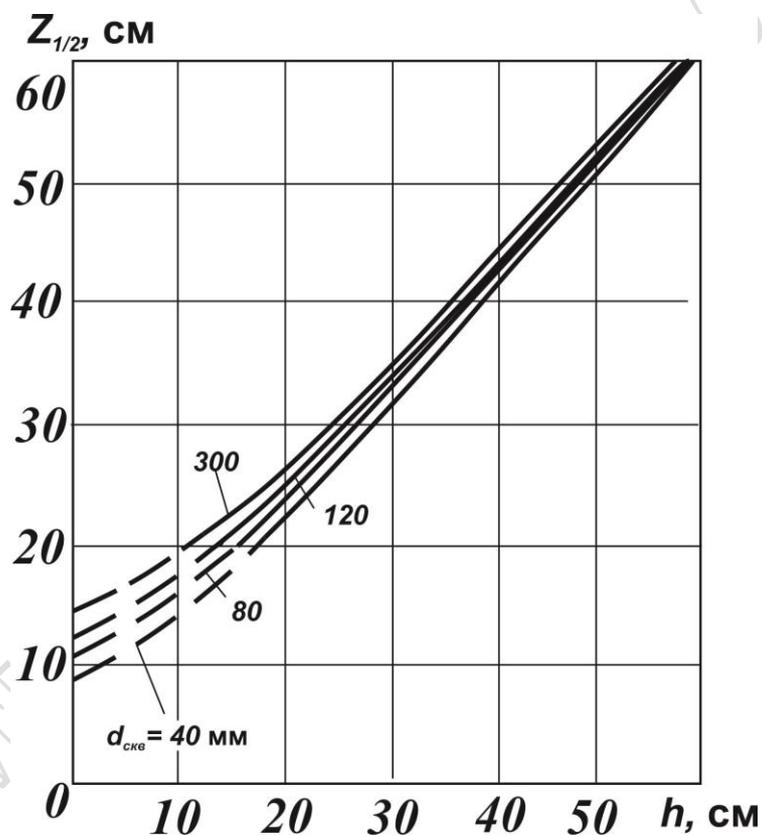


Рисунок 6 – Зависимость ширины  $\gamma$ -аномалии  $Z_{1/2}$  от мощности рудного пласта  $h$  для различных диаметров

**Способ  $(1/2)J_{\text{max}}$**  также применяют для интерпретации диаграмм, соответствующих рудным интервалам с резким переходом во вмещающие породы. По этому способу границы рудного интервала находят по положению проекций на ось глубин точек, в которых частота импульсов равна половине разности между частотой импульсов в ближайшем локальном максимуме и частотой импульсов от вмещающих пород. Если аномалия

вблизи границ не имеет четких максимумов, то положение границ определяют по проекциям на ось глубин точек, в которых «прямолинейные» участки крыльев графика  $\gamma$ -аномалии делятся пополам (точки *A* и *B* на рисунке 7).

**Способ  $J_{зад}$**  применяют для определения границ рудных интервалов с непрерывно и постепенно меняющейся массовой долей урана по мощности рудного интервала; на участке длиной не менее  $100/\rho$ , где  $\rho$  – плотность руды,  $г/см^3$ . Границы рудных интервалов по этому способу находят по положению на оси глубин проекций точек, в которых частота импульсов равна заданной.

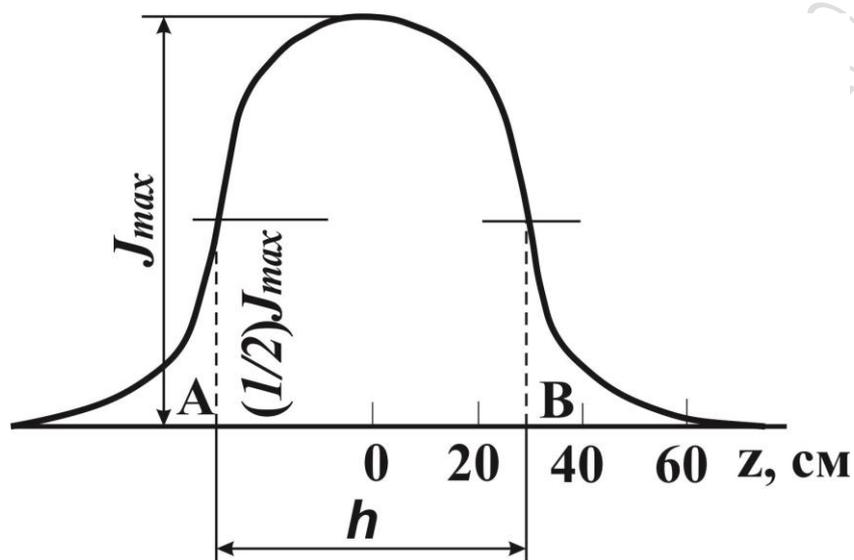


Рисунок 7 – Пример определения мощности рудного интервала способом  $(1/2) J_{макс}$

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

$$J_{зад} = k_0 \cdot C_{зад} ,$$

где  $C_{зад}$  – бортовая массовая доля урана в кондиционной руде.

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

$$C_U = \frac{S}{h \cdot k_0} ,$$

где  $S$  – площадь  $\gamma$ -аномалии, *см. nA/кг*;

$h$  – мощность рудного интервала, *см.*

При наличии в скважинах бурового раствора и обсадных труб или когда в рудах нарушено радиоактивное равновесие или присутствует торий, в полученное значение  $C_U$  вносят соответствующие поправки.

Контур, в пределах которого измеряют площадь  $\gamma$ -аномалии, устанавливают различным образом в зависимости от выбранного способа определения границ рудного тела. Если границы определяют способом  $(1/2)J_{max}$  или  $Z_{1/2}$ , то для оконтуривания  $\gamma$ -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 (контур  $ABCEFG$  на рисунке 8).

Если к рудному интервалу примыкают некондиционные руды, уровень фонового излучения проводят параллельно оси глубин через ближайшую к крылу аномалии точку перегиба или из ближайшего локального минимума.

Если границы рудного интервала определены способом  $J_{зад}$ , то площадь  $\gamma$ -аномалии оконтуривают графиком гамма-каротажа, осью глубин и перпендикулярам к ней из точек, соответствующих границам рудного интервала (контур  $ABCD$  на рисунке 8).

Площадь  $\gamma$ -аномалии измеряют планиметром или подсчитывают по формуле для трапеций в сантиметрах квадратных, а затем с учетом масштаба по осям глубин и частоты импульсов пересчитывают в единицы  $см \cdot nA/кг$ .

При мощности рудных тел  $h < 15$  см достаточно точно определяют «метропроцент», т. е. величину  $hC_U$ , а мощность рудного интервала и массовую долю урана в нем получают отдельно с невысокой точностью.

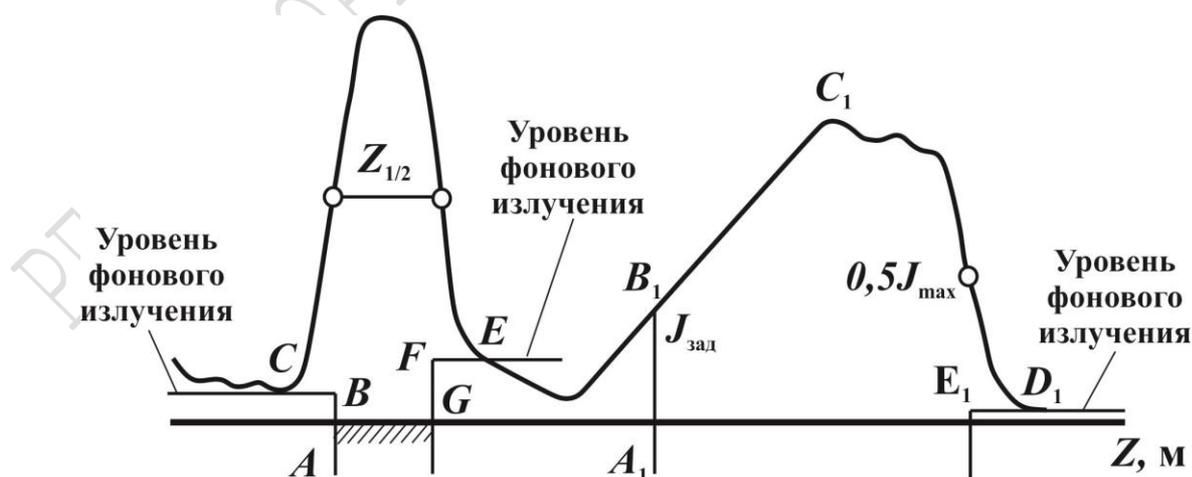


Рисунок 8 – Оконтуривание площади  $\gamma$ -аномалии

## Вопросы для самоконтроля

- 1 Какова глубинность исследований методом гамма-каротажа?
- 2 От каких параметров пласта зависит форма кривой гамма-каротажа?
- 3 Каким образом сказывается мощность пласта на кривых гамма-каротажа?
- 4 Какие параметры пласта определяются при количественной интерпретации кривых гамма-каротажа?
- 5 Какие способы определения мощности рудных интервалов используются при количественной интерпретации аномалий гамма-каротажа?

## 2 РАДИОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ

- 2.1 Принцип гамма-опробования.
- 2.2 Методика проведения гамма-опробования.
- 2.3 Обработка и интерпретация данных гамма-опробования.

### 2.1 Принцип гамма-опробования

Радиометрическое опробование является геофизическим методом опробования радиоактивных руд на месте залегания. Его применяют на всех стадиях геологоразведочного процесса для определения мощности рудных тел и содержания радиоактивных элементов в открытых и подземных горных выработках.

Известны следующие методы радиометрического опробования:

- 1)  $\gamma$ -опробование – с направленным приемом излучения и по разностному эффекту;
- 2)  $\beta$ -опробование и комплексное  $\beta+\gamma$ -опробование;
- 3) шпуровое  $\gamma$ -опробование.

*Гамма-опробование* – это метод определения массовой доли урана (тория) в рудном теле и границ рудных тел, основанный на измерении интенсивности  $\gamma$ -излучения горных пород и руд на стенках горных выработок.

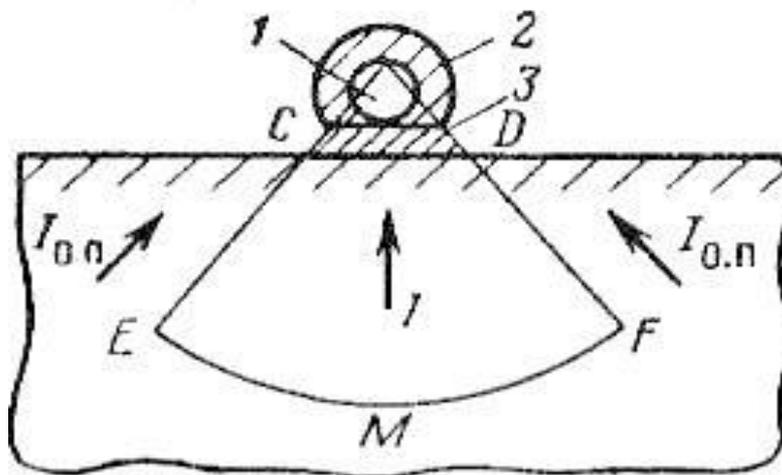
При гамма-опробовании из общего  $\gamma$ -излучения регистрируют  $\gamma$ -излучение только опробуемого участка. Локализация достигается двумя способами: 1) разностного эффекта; 2) направленного приема излучения. Необходимость локализации вызывается наличием мешающего бокового

излучения, которое в условиях выработок может во много раз превосходить излучение опробуемого участка.

**Способ разностного эффекта (опробование с экраном).** В данном способе используют свинцовые экраны для исключения влияния космического излучения, которые по форме могут быть цилиндрические, пластинчатые, U-образные.

При опробовании с экранами определяется интенсивность, создаваемая некоторым участком поверхности выработки (обнажения), с исключением влияния космического и собственного фона прибора и излучения других участков выработки.

В процессе опробования последовательно проводят два измерения: первое, когда между счетчиком и исследуемой поверхностью находится свинцовый экран, второе – когда счетчик находится в том же положении относительно поверхности, но экран снят (рисунок 9).



1 – счетчик, 2 – щелевой экран, 3 – свинцовый фильтр

Рисунок 9 – Схема радиометрического опробования с щелевым экраном и фильтром из свинца

Интенсивность  $\gamma$ -излучения  $I_1$  при измерениях без экрана является суммой интенсивности  $I$ , создаваемой исследуемым участком, интенсивности  $I_{оп}$  окружающих пород и нормального фона  $I_{ф}$ :

$$I_1 = I + I_{оп} + I_{ф}.$$

Интенсивность  $\gamma$ -излучения  $I_2$ , измеренная с экраном,

$$I_1 = \alpha \cdot I + I_{\text{оп}} + I_{\text{ф}},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий ослабление  $\gamma$ -излучения  $I$  в экране.  
В первом приближении:

$$\alpha = e^{-\mu x},$$

где  $x$  – толщина экрана;

$\mu$  – линейный коэффициент поглощения излучения в материале экрана.

Решая совместно полученные уравнения, получим формулу

$$I = \frac{I_1 - I_2}{1 - \alpha},$$

в которую входят лишь известные величины, а неизвестные  $I_{\text{оп}}$  и  $I_{\text{ф}}$  исключаются.

Пропорциональность между  $I$  и  $I_1 - I_2$ , совместно с пропорциональностью величин  $I$  и  $C$  позволяет написать выражение:

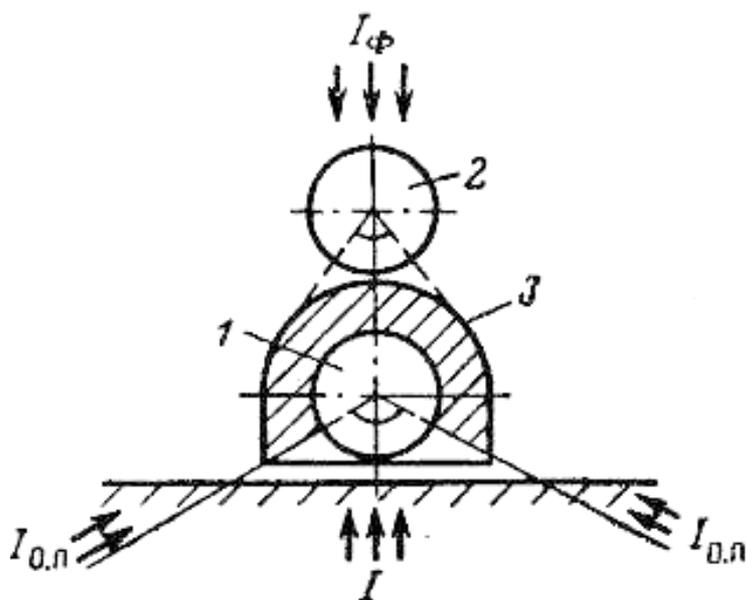
$$C = \frac{I_1 - I_2}{100 \cdot B},$$

где  $B$  – коэффициент прибора (в  $\text{мкР/ч}$  на 0,01 % U), определяемый экспериментально над поверхностью насыщенных моделей пластов с известным содержанием урана.

**Способ направленного приема излучения.** В данном способе используются радиометры с детекторами направленного приема излучения: сцинтилляционные счетчики, состоящие из двух кристаллов с разным временем свечивания; счетчики с коллиматорами (толстостенные свинцовые экраны с отверстиями); приемники с компенсационными системами.

В радиометрическом опробовании распространение получили детекторы с компенсационными системами. Они реализованы в аппаратуре типа РГН и представляют собой систему из двух однотипных счетчиков с различной интегральной чувствительностью  $k_1$  и  $k_2$ , разделенных свинцовым экраном (рисунок 10). При этом значения  $k_1$  и  $k_2$  подбирают так, чтобы

$$\frac{k_2}{k_1} = \alpha.$$



1 – основной счетчик, 2 – фоновый счетчик, 3 – свинцовый фильтр

Рисунок 10 – Схема радиометрического опробования с щелевым экраном и фильтром из свинца

Интенсивность  $\gamma$ -излучения, регистрируемая двумя такими счетчиками, будет соответственно равна:

$$I_1 = k_1 (I + \alpha(I_{оп} + I_{\phi})),$$

$$I_2 = k_2 (\alpha I + I_{оп} + I_{\phi}).$$

Отсюда получим:

$$I_1 - I_2 = I k_1 (1 - \alpha^2) \text{ или } I = \frac{I_1 - I_2}{k_1 (1 - \alpha^2)}.$$

Таким образом, в этом случае разность  $I_1 - I_2$  зависит только от  $I$  и не зависит от  $I_{оп}$  и  $I_{\phi}$ , а для  $C$  имеем соотношение

$$C = \frac{I_1 - I_2}{100 \cdot B}.$$

Чтобы отношение чувствительностей детекторов обоих каналов оставалось постоянным во всех направлениях, в которых должно быть ском-

пенсировано действие  $\gamma$ -излучения, подбирают свинцовые экраны соответствующей формы и толщины, в которые помещены кристаллы. Режим компенсации устанавливают, регулируя чувствительность компенсационного канала при измерении  $\gamma$ -излучения от специальных источников.

Важная характеристика радиометров направленного приема – *диаграмма направленности*, показывающая чувствительность радиометра в разных направлениях. Графически ее изображают в полярных или прямоугольных координатах. Чувствительность на диаграммах обычно наносят в относительных единицах, например в долях максимальной чувствительности.

После установления режима компенсации проводят градуировку приборов по точечному радиевому источнику для определения пересчетного коэффициента (коэффициента прибора  $B$ ).

## 2.2 Методика проведения гамма-опробования

Методика проведения гамма-опробования определяется морфологией рудных тел (протяженностью и формой) и горно-техническими факторами – условиями вскрытия рудных тел горными выработками.

Расстояния между профилями и шаг опробования по профилю выбирают с расчетом получения представительных результатов при данной неравномерности оруднения.

При гамма-опробовании с экранами большей частью применяют гамма-радиометры, имеющие детекторы  $\text{NaI(Tl)}$  с фильтром из  $2,5 \text{ мм Fe}^{+2} \cdot \text{мм Pb}$ . Такой фильтр уменьшает влияние вещественного состава руд на результаты гамма-опробования и почти полностью устраняет влияние обратно рассеянного  $\gamma$ -излучения.

Для получения разностного эффекта используют два типа свинцовых экранов: цилиндрические толщиной примерно  $1,5 \text{ см}$  с продольной щелью, закрываемой вкладышем, называемые *щелевыми* (экраном 1-го типа), и конические с окном в торце, закрываемым плоским свинцовым вкладышем толщиной примерно  $1 \text{ см}$ , называемые *торцовыми* (экраном 2-го типа).

Размеры зоны опробования радиометров с экранами определяются геометрическими условиями измерений, которые зависят от типа применяемого экрана. Для экранов 1-го типа геометрические условия характеризуются центральным углом раствора экрана  $2\varphi$ , измеряемым в плоскости сечения, перпендикулярной оси цилиндра, а для экранов 2-го типа – центральным углом кругового конуса  $2\varphi$ , вершина которого расположена в центре сцинтиллятора, а образующая проходит по периметру окна цилиндра.

Крупные и средние рудные тела опробуют по системе параллельных профилей, секущих рудное тело в крест простирания. Такой вид опробования называют *линейным*.

Для опробования рудных тел с крайне неравномерным характером оруднения применяют *площадное опробование* при равномерном расположении точек измерений.

Шаг опробования по профилю обычно принимают равным 0,1 м. Для рудных тел большой мощности с равномерным распределением оруднения он может быть увеличен до 0,2 м.

Если опробуют маломощные рудные тела ( $h < 30$  см), то измерения следует проводить с выходом на 30–40 см во вмещающие породы для получения полной площади  $\gamma$ -аномалии, в случае мощных рудных тел иногда достаточно измерений в пределах заданных границ этих тел.

При гамма-опробовании со щелевыми экранами во всех точках измерений делают два замера: с открытой щелью и с закрытой; с радиометрами направленного приема на каждой точке выполняют одно измерение. Длительность измерения на точке выбирают исходя из допустимой погрешности результатов измерений.

Перед началом и после окончания измерений контролируют чувствительность радиометра с помощью какого-либо источника  $\gamma$ -излучения.

## **2.3 Обработка и интерпретация данных гамма-опробования**

Результаты гамма-опробования представляют в виде графиков и выражают в единицах мощности экспозиционной дозы по радиевому источнику.

Форма кривой  $\gamma$ -опробования над рудными телами зависит от диаграммы направленности радиометра направленного приема или от угла раствора щелевого экрана и его расположения относительно линии опробования. Если щель экрана располагать по профилю опробования, то происходит значительное «уширение» формы  $\gamma$ -аномалии, причем для рудных тел малой мощности сигнал примерно в 2 раза шире, а «насыщение» наступает практически в 2 раза медленнее, чем в случае расположения щели экрана перпендикулярно профилю опробования. Следовательно, для получения данных о детальном изменении поля  $\gamma$ -излучения щель экрана должна быть перпендикулярна профилю опробования. В случае мощных рудных тел для получения интегральных характеристик рудного пересечения щель экрана следует располагать параллельно профилю опробования.

Интерпретацию данных гамма-опробования проводят или графическим способом, или с помощью ЭВМ.

В основе графического способа интерпретации лежит зависимость между площадью диаграммы гамма-опробования по разностному эффекту  $\Delta S$  и средней массовой долей урана в рудном пересечении

$$\Delta S = C_U \cdot h \cdot B.$$

При опробовании рудных тел мощностью менее 1 м для каждого профиля опробования строят графики интенсивности  $\gamma$ -излучения, а затем по ширине  $\gamma$ -аномалии  $Z_{1/2}$  определяют мощность рудного пересечения  $h$ . Связь между  $h$  и  $Z_{1/2}$  показана на рисунке 11.

Зная площадь аномалии, массовую долю урана рассчитывают по формуле:

$$C_U = \frac{\Delta S}{h \cdot B}.$$

Если мощность рудных пересечений более 1 м, интервал опробования разбивают на секции длиной 0,3–0,5 м и для каждой секции подсчитывают среднюю массовую долю урана путем деления средней интенсивности  $\gamma$ -излучения по разностному эффекту на пересчетный коэффициент.

Для получения сведений о детальном изменении массовой доли урана вдоль профиля опробования интерпретацию проводят с помощью ЭВМ.

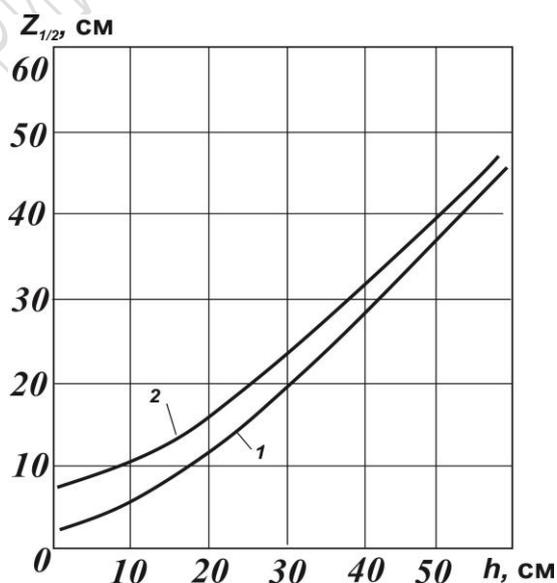


Рисунок 11 – Определение мощности рудного пересечения по ширине графика  $\gamma$ -аномалии  $Z_{1/2}$

## Вопросы для самоконтроля

- 1 Что такое радиометрическое опробование и для чего оно применяется?
- 2 Перечислите методы радиометрического опробования.
- 3 В чем суть радиометрического опробования способом направленного приема излучения?
- 4 В чем суть радиометрического опробования способом разностного эффекта?
- 5 Чем определяется методика проведения гамма-опробования?
- 6 Какие методы используются для интерпретации результатов гамма-опробования?

## 3 ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

- 3.1 Классификация методов.
- 3.2 Источники  $\gamma$ -излучения.
- 3.3 Гамма-нейтронный (фотонейтронный) метод (ГНМ).
- 3.4 Гамма-гамма метод (ГГМ).

### 3.1 Классификация методов

Методы ядерной геофизики основаны на использовании искусственных источников ионизирующего излучения, которое взаимодействует с ядрами или электронами глубоких орбит (оболочек) атомов анализируемых элементов.

При взаимодействии возбуждающего (первичного) излучения с ядрами атомов образуются радиоактивные нуклиды, обладающие специфическими для каждого элемента периодом полураспада, видом и энергией испускаемых частиц и квантов.

При взаимодействии первичного излучения с электронами атомов возбуждается характеристическое рентгеновское излучение. По вторичным излучениям ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $n$ -характеристическое рентгеновское) можно определить различные элементы как в пробах в условиях лаборатории, так и в рудах на месте залегания.

В качестве первичного излучения в методах ядерной геофизики используют  $\gamma$ - и нейтронное излучения, поскольку  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения имеют

малую проникающую способность. Исходя из этого, все ядерно-физические методы условно делятся на две группы (по типу источника первичного излучения): *активные гамма-методы* и *нейтронные методы*. В название того или иного метода ядерной геофизики – обычно включается обозначение первичного излучения, воздействующего на горную породу, и характер взаимодействия или вид вторичного излучения, которое испускается горной породой и регистрируется детектором: *гамма-гамма-метод*, *нейтрон-нейтронный метод* и т. д.

Ядерно-физические методы имеют небольшой радиус действия (первые десятки сантиметров), что ограничивает их возможности при решении тех или иных задач геологоразведки: исследовании горных пород, вскрываемых горными выработками и скважинами, анализе отобранных проб в условиях лаборатории.

### 3.2 Источники $\gamma$ -излучения

В активных гамма-методах для возбуждения требуемых реакций в качестве источников  $\gamma$ -излучения используют искусственно получаемые на ядерных реакторах радиоактивные изотопы. Каждый применяемый в методах геофизики изотоп характеризуется тремя основными параметрами: энергией фотонов  $\gamma$ -излучения, периодом полураспада и активностью источника.

Определяющим фактором при выборе источника является энергия  $\gamma$ -квантов, излучаемых им. Так как все источники не образуют рядов радиоактивных превращений, источник в большинстве случаев испускает  $\gamma$ -излучение с энергетическим спектром, включающим одну или несколько линий. Качество спектра  $\gamma$ -излучения источника зависит от вида процесса превращения, при котором происходит  $\gamma$ -излучение.

Основными процессами превращения, при которых возникает  $\gamma$ -излучение, являются:

*Изомерный переход* – это процесс, при котором возбужденное ядро атома переходит в стабильное состояние без выделения частиц, а только за счет выделения энергии в виде  $\gamma$ -кванта. Порядковый номер  $Z$  и массовое число  $A$  при изомерном переходе не изменяются, в результате получаем чистый спектр  $\gamma$ -излучения. Таким свойством обладает изотоп  $\text{Sn}^{119}$ .

*Электронный захват*, этот процесс приводит к образованию спектра  $\gamma$ -излучения высокой чистоты. При захвате электрона собственной оболочки ядро испускает  $\gamma$ -квант типичной для данного ядра энергии. Атом, потерявший электрон с ближайшей оболочки, переходит в нормальное со-

стояние, испустив квант характеристического излучения в рентгеновской области спектра. В некоторых случаях ядро при переходе в основное состояние передает энергию одному из электронов атома, в результате чего также возникает характеристическое рентгеновское излучение.

*β-превращение*, при котором возникают  $\gamma$ -излучение и характеристическое рентгеновское излучение атома. Некоторые  $\beta$ -излучатели, например тритий ( $\text{H}^3$ ) и прометий-147 ( $\text{Pm}^{147}$ ), при  $\beta$ -превращении не испускают  $\gamma$ -излучения. Такие вещества являются источниками рентгеновского излучения с непрерывным спектром, возникающего как тормозное излучение при уменьшении скорости в результате взаимодействия  $\beta$ -частиц с веществом источника и корпуса ампулы, содержащей источник. Так как выход тормозного излучения измеряется единицами процентов активности источника, для получения достаточно мощного потока тормозного  $\gamma$ -излучения источники должны иметь активность ( $n \cdot 10^{10}$ – $n \cdot 10^{11}$  Бк). Недостаток  $\beta$ -излучающих источников – низкая чистота спектра  $\gamma$ -излучения.

Источники  $\gamma$ -излучения, используемые в радиометрии, включают образцовые источники второго класса из  $\text{Ra}^{226}$ , предназначенные для градуирования радиометров.

Эти источники изготавливаются из порошкообразного  $\text{RaBr}_2$ , который запаивается в стеклянные ампулы (безборное стекло марки Ц-32). Ампула помещается в латунный футляр. Ампулы разделены резиновыми колпачками, обеспечивающими их сохранность.

Источники  $\gamma$ -излучения изготавливаются нескольких серий (с разной массой радия).

Мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения на расстоянии 1 м от такого источника определяется по формуле

$$P = \frac{840 \cdot m}{r^2},$$

где 840 –  $\gamma$ -постоянная радия в стандартном источнике в ( $\text{мкР/ч}$ ) на расстоянии 1 м от источника с массой  $\text{Ra}^{226}$  1 мг;

$m$  – масса  $\text{Ra}^{226}$  в источнике (в мг);

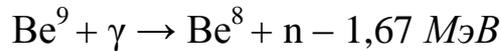
$r$  – расстояние от источника (в м).

В качестве контрольных источников в радиометрической практике используются источники из  $\text{Co}^{60}$ , изготавливаемые в виде диска диаметром 6 мм, запрессованного в диск из алюминия или нержавеющей стали. Основным недостатком – низкий период полураспада ( $T_{1/2} = 5,25$  года).

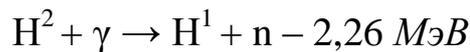
Для настройки, усиления и определения разрешения гамма-спектрометров используется источник  $\gamma$ -излучения  $\text{Zn}^{65}$  ( $T_{1/2} = 245,7$  суток и  $E_\gamma = 1,1$  МэВ).

### 3.3 Гамма-нейтронный (фотонейтронный) метод (ГНМ)

Гамма-нейтронный (фотонейтронный) метод (ГНМ) основан на реакции поглощения бериллием  $\text{Be}^9$   $\gamma$ -квантов с энергией, превышающей порог фотоядерной реакции:



Аналогично протекает реакция при облучении дейтерия:



Здесь знак минус показывает, что реакция идет с поглощением энергии, при взаимодействии с ядром  $\text{Be}^9$  энергия  $\gamma$ -кванта должна составлять  $1,67 \text{ МэВ}$ , а при взаимодействии с ядром дейтерия –  $2,26 \text{ МэВ}$ .

Ядра других элементов имеют более высокий порог фотонейтронной реакции, для обеспечения которой не могут быть использованы естественные и искусственно получаемые  $\gamma$ -излучатели.

В геофизике гамма-нейтронный метод (ГНМ) применяется для определения  $\text{Be}$  в образцах горных пород и в условиях их естественного залегания. Для обеспечения селективности анализа на  $\text{Be}$  необходимо  $\gamma$ -излучение с энергией, промежуточной между порогами реакций на  $\text{Be}$  и  $\text{D}$  (от  $1,67$  до  $2,23 \text{ МэВ}$ ). В качестве источника  $\gamma$ -излучения используется изотоп  $\text{Sb}^{124}$  ( $E_\gamma = 1,69 \text{ МэВ}$  (50 % от числа распада) и  $E_\gamma = 2,09 \text{ МэВ}$  (~ 6,5 %). Поскольку сечение реакции  $\text{Be}^9 (\gamma, n)$  при таких энергиях невелико, берут сравнительно большие навески проб, а для более полного использования излучения источника его помещают внутри кассеты с пробой. Из-за значительной активности используемых источников датчик установки для биологической защиты окружают свинцовым экраном, а также используют дистанционные устройства для смены проб. Кроме этого источника могут применяться и другие, испускающие фотоны с энергиями, превышающими  $1,69 \text{ МэВ}$ , но большинство из них либо очень короткоживущие, либо имеют малый выход  $\gamma$ -квантов в нужном интервале энергий. В нефтяной геофизике фотонейтронный метод применяется для определения концентрации дейтерия в воде и нефти. Концентрация  $\text{D}_2\text{O}$  в водах около 0,1 %, в связи с чем требуются источники  $\gamma$ -излучения большой активности с энергией фотонов свыше  $2,38 \text{ МэВ}$ . На практике используется изотоп  $\text{Na}^{24}$  активностью до  $4 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ , испускающий  $\gamma$ -кванты с энергией  $2,75 \text{ МэВ}$ . В результате поглощения фотона ядро  $\text{Be}$  испускает нейтроны со средней энергией  $0,15\text{--}0,83 \text{ МэВ}$ .

Для изучения ореолов Вe на поверхности пород, а также для опробования руд в горных выработках и на обнажениях применяют переносные приборы, называемые бериллометрами.

Для поисков руд Вe по ореолам рассеяния благоприятным обстоятельством является довольно спокойный фон нейтронного излучения.

Опробование на Вe проводят по профилям, ориентированным в крест простирания рудных тел.

Результаты гамма-нейтронного опробования изображают в виде графиков скорости счета нейтронов  $N$  по профилям опробования и определяют мощность рудных тел  $h$  и концентрацию  $C$  в них Вe.

Между площадью аномалии  $S_a$  и мощностью пласта  $h$  существует пропорциональная зависимость:

$$S_a = k \cdot C \cdot h,$$

где  $C$  – концентрация Вe в рудном теле;

$k$  – пересчетный коэффициент, выражаемый в имп/мин на 1 % ВeO при постоянной активности источника  $\gamma$ -излучения.

Границы рудных тел, а следовательно, и их мощность, определяют следующими способами:

1 Способ  $(1/2)N_{max}$  ( $N_{max}$  – амплитуда аномалии) применяют для определения границ насыщенных пластов ( $h\sigma > 80 \text{ г/см}^2$ ), имеющих четкие границы с вмещающими породами.

2 Для маломощных пластов границы определяют по ширине аномалии  $Z_{1/2}$  на половине ее высоты, используя экспериментально полученную зависимость  $Z_{1/2} = f(h)$ .

3 В случае постепенного увеличения концентрации Вe к центру рудного тела границы кондиционных руд устанавливают по скорости счета соответствующей бортовой концентрации Вe. Концентрацию Вe в насыщенном пласте вычисляют по формуле:

$$C = N_{max} \cdot h.$$

При любой мощности рудного тела можно использовать формулу

$$C = \frac{S_a}{k \cdot h}.$$

Пересчетный коэффициент  $k$  определяют для каждого типа руд путем статистического сравнения результатов гамма-нейтронного и геологического опробования одного и того же профиля.

### 3.4 Гамма-гамма-метод (ГГМ)

*Гамма-гамма-метод* применяют главным образом для определения плотности пород и руд (*плотностной гамма-гамма-метод ГГМ-П*) и определения концентрации некоторых тяжелых элементов (*селективный гамма-гамма-метод ГГМ-С*).

В основу метода положено измерение рассеянного  $\gamma$ -излучения, возникающего при комптоновском взаимодействии  $\gamma$ -излучения источника с изучаемой средой. Для облучения среды используют точечные источники  $\gamma$ -излучения.  $\gamma$ -поле точечного источника в конкретных условиях (определенная активность и энергия  $\gamma$ -излучения, тип детектора, геометрия измерений) является функцией плотности среды  $\sigma$  и ее эффективного атомного номера  $Z_{\text{эф}}$ .

При определенных условиях влияние  $\sigma$  и  $Z_{\text{эф}}$  можно выделить отдельно. На определении этих двух параметров и основано применение указанных выше модификаций гамма-гамма-методов.

**Плотностной гамма-гамма-метод.** Определение плотности пород в естественном залегании гамма-гамма-методом выполняют, помещая на поверхность породы или внутри ее источник направленного в среду  $\gamma$ -излучения и детектор, защищенный свинцовым экраном от первичного излучения.

Условием однозначного определения плотности является использование такого диапазона энергий  $\gamma$ -излучения, где преобладает комптоновское рассеяние  $\gamma$ -квантов, которое не зависит от состава среды, поскольку для всех порообразующих элементов отношение  $Z/A = 0,5$ . Для большинства горных пород ( $Z_{\text{эф}} = 12-15$ ) комптоновское рассеяние будет преобладать при  $E > 0,2-0,3 \text{ МэВ}$ .

При таких условиях рассеяние  $\gamma$ -квантов, испускаемых источником, зависит только от плотности среды, и измерение ослабленного  $\gamma$ -излучения позволяет определять ее плотность. Если вещественный состав постоянен ( $Z_{\text{эф}} = \text{const}$ ), то между мощностью дозы рассеянного  $\gamma$ -излучения и плотностью имеется обратная пропорциональная зависимость (при  $\sigma > 0,8 \text{ г/см}^3$ ).

В качестве источников  $\gamma$ -излучения используют радионуклиды  $\text{Cs}^{137}$  ( $E_{\gamma} = 0,66 \text{ МэВ}$ ) и  $\text{Co}^{60}$  ( $E_{\gamma} = 1,17$  и  $1,33 \text{ МэВ}$ ). Для измерения рассеянного излучения применяют газоразрядные детекторы, имеющие малую эффективность в низкоэнергетической области  $\gamma$ -излучения, или сцинтилляционные детекторы с кристаллами  $\text{NaJ(Tl)}$  и металлическими фильтрами. Источник и детектор помещают в один датчик (зонд). Защиту детектора от прямого  $\gamma$ -излучения источника осуществляют разделительным свинцовым экраном. Прибор для определения плотности по рассеянному  $\gamma$ -излучению называют гамма-плотномером.

Плотномеры предварительно градуируют непосредственно на месторождении, чтобы учесть влияние вещественного состава пород, поверхности пород в обнажениях и особенности скважин. Градуирование проводят на породах с известной плотностью и строят градуировочные графики.

Плотность пород в обнажениях и горных выработках определяют по измерениям в отдельных точках, расположенных обычно на расстояниях, равных длине зонда гамма-плотномера.

**Селективный гамма-гамма-метод.** В этой модификации используют мягкое  $\gamma$ -излучение ( $E_\gamma < 0,3$  МэВ), для которого существенную роль играет фотоэлектрическое поглощение рассеянного излучения в горных породах. В этом случае регистрируемая  $\gamma$ -активность рассеянного излучения будет зависеть от  $Z_{эф}$  пород, который может быть однозначно связан с примесями тяжелых элементов. Метод ГГМ-С применяют для опробования руд в обнажениях и горных выработках с целью определения концентрации таких элементов, как Fe, Hg, Sb, W, Pb и др.

В качестве источников мягкого  $\gamma$ -излучения используют  $Se^{75}$  ( $E_\gamma = 0,136$  и  $0,265$  МэВ),  $Tm^{170}$  ( $E_\gamma = 0,052$  и  $0,084$  МэВ),  $Co^{57}$  ( $E_\gamma = 0,123$  МэВ) и др. Излучение регистрируют сцинтилляционными детекторами с тонкими кристаллами NaJ(Tl). Источник и детектор помещают в зонд, корпус которого изготовлен из материала с малым атомным номером, пропускающего  $\gamma$ -излучение с энергией в пределах  $0,05$ – $0,3$  МэВ, например из Al или органических пластмасс. Длина зонда обычно составляет  $10$ – $30$  см.

Однако и в случае преобладания фотоэлектрического поглощения ослабление  $\gamma$ -квантов будет зависеть не только от  $Z_{эф}$ , но и от плотности пород, поскольку в интервале энергий, характерном для ГГМ-С, зависимость рассеянного  $\gamma$ -излучения от плотности такая же, как и в области более высоких энергий. Поэтому довольно часто изменение плотности создает эффект, соизмеримый с эффектом изменения вещественного состава пород.

Для устранения влияния изменения плотности на результаты ГГМ-С используют следующие способы:

- 1 Одновременная регистрация двух энергетических составляющих  $\gamma$ -поля: мягкой составляющей с энергией до  $0,15$ – $0,20$  МэВ, зависящей от  $Z_{эф}$  и  $\sigma$ , и жесткой составляющей с  $E_\gamma > 0,3$  МэВ, которая зависит только от  $\sigma$ . Затем рассчитывают  $Z_{эф}$ . В этом способе используют спектрометрию рассеянного  $\gamma$ -излучения.

- 2 Применение инверсионного зонда. Зависимость рассеянного  $\gamma$ -излучения от  $\sigma$  пород при его малой длине (*доинверсионный зонд*) возрастает, а при большей (*заинверсионный зонд*) уменьшается. При некоторой длине зонда величина рассеянного излучения не будет зависеть от изменения плотности в пределах  $\pm 20$ – $30$  %. Такой зонд называют *инверсионным*.

- 3 Применение двойного зонда при использовании двух источников, расположенных на разных расстояниях от детектора. В этом случае рас-

стояние между первым источником и детектором выбирают таким образом, чтобы зонд был доинверсионным, а расстояние между вторым источником и детектором соответствовало бы заинверсионному зонду. В этом случае будет скомпенсировано изменение плотности пород в некотором интервале.

## Вопросы для самоконтроля

- 1 Какие источники  $\gamma$ -излучения используются в активных гамма-методах для возбуждения требуемых реакций?
- 2 В чем сущность гамма-нейтронного метода?
- 3 В чем сущность гамма-гамма-метода и его модификации?
- 4 Какие задачи решаются активными гамма-методами?

## 4 НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ

- 4.1 Источники нейтронов.
- 4.2 Нейтрон-нейтронные методы (ННМ).
- 4.3 Нейтронный гамма-метод (НГМ).
- 4.4 Нейтронный активационный метод (НАМ).

К нейтронным методам в ядерной геофизике относят методы, основанные на взаимодействии нейтронов с породами и рудами и на последующей регистрации вторичных нейтронов, возникающих в результате ядерных реакций, либо вторичного  $\gamma$ -излучения, возникающего под воздействием нейтронов.

### 4.1 Источники нейтронов

В нейтронных методах используют плутоний-бериллиевые, радий-бериллиевые, полоний-бериллиевые и полоний-борные источники нейтронов, которые в основном изготавливаются в виде двойных герметизированных ампул из нержавеющей стали (полоний-борные источники выпускаются в ампулах из хромированной латуни).

**Плутоний-бериллиевые ( $Pu+Be$ )** источники быстрых нейтронов изготавливаются из сплава плутония с бериллием и характеризуются постоянством потока внешнего излучения благодаря большому периоду полурас-

пада плутония  $T_{1/2} = 24360$  лет). Выход нейтронов в таких источниках составляет от  $1 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^7$  нейтр/с, а энергия нейтронов от 0,3 до 11 МэВ. Достоинства этого типа источников нейтронов – стабильность внешнего потока нейтронов и практически полное отсутствие  $\gamma$ -излучения.

**Радий-бериллиевые (Ra+Be)** источники нейтронов представляют собой смесь тонкого порошка металлического Be с бромистой солью радия, смешанных в отношении 3–5 г бериллия на 1 г (RaBr<sub>2</sub>) и спрессованных в таблетку; а таблетка помещается в металлическую ампулу. Недостаток (Ra+Be) источника – высокая мощность потока  $\gamma$ -излучения, что требует надежной защиты.

**Полоний-бериллиевые (Po+Be)** источники с относительно короткоживущими альфа-излучателями. На порошок карбида бериллия осаждается Po<sup>210</sup>. Такие источники изготавливаются двух типов с выходом нейтронов от  $0,9 \cdot 10^6$  до  $9 \cdot 10^7$  и от  $10^6$  до  $4 \cdot 10^8$  нейтр/с. Активность (Po+Be) источников убывает по экспоненциальному закону относительно быстро (т. к.  $T_{1/2}Po = 138,4$  суток).

**Полоний-борный (Po+B)** источник нейтронов изготавливается из смеси полония и карбида бора. Получаемые нейтроны характеризуются энергией 4,5–5 МэВ, а выход внешнего излучения от  $10^6$  до  $10^7$  нейтр/с. Недостатки источников – выход нейтронов у них в 6 раз меньше выхода нейтронов (Po+Be) источника.

## 4.2 Нейтрон-нейтронные методы (ННМ)

Использование нейтрон-нейтронных методов основано на том, что распространение нейтронов в горных породах зависит от замедляющих и поглощающих свойств этих пород. Замедление нейтронов определяется в основном содержанием  $H$  в горных породах, а поглощающие свойства – наличием элементов с высоким сечением поглощения тепловых и надтепловых нейтронов, таких, как В, Li, Cd, Mn, Cl, Hg и др. Эти особенности нейтронного поля позволяют использовать нейтрон-нейтронные методы для определения *влажности горных пород и концентрации элементов с большими сечениями поглощения нейтронов.*

**Определение влажности горных пород.** Проводится приборами- влагомерами, в которых применяют источники нейтронов с выходом (6–8)  $10^4$  нейтр/с, а в качестве детекторов – пропорциональные борные и сцинтилляционные детекторы тепловых нейтронов. Кожух, в который заключен зонд, является одновременно фильтром, поглощающим тепловые и замедляющим надтепловые нейтроны. Наиболее подходящим для этой

цели является фильтр из Al толщиной несколько миллиметров, незначительно ослабляющий скорость счета.

Приборы, используемые для измерений, предварительно градуируют на типичных грунтах с различной влажностью, величина которой определена независимым методом. Градуировочный график строят для средней плотности сухого грунта, а изменения плотности при полевых исследованиях учитывают введением соответствующей поправки.

#### **Определение элементов с высоким сечением поглощения нейтронов.**

В настоящее время наиболее полно разработана методика определения В в лабораторных и полевых условиях. Нейтрон-нейтронный метод применяют также для поисков и опробования руд Mn, Cd, Li, Hg, редких земель и др. По результатам борометрического профилирования выявляют и оконтуривают участки с повышенной концентрацией В. Нейтронное опробование горных выработок играет ведущую роль при подсчете запасов борного сырья. Поглощение нейтронов В приводит к появлению ядер He и Li в результате реакции  $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ . Чем больше В содержит порода, тем сильнее поглощение нейтронов и тем меньше их число будет достигать детектора.

Разработаны два варианта метода: *автомобильный и пешеходный*.

В *автомобильном* варианте съемку ведут с помощью датчика, буксируемого по поверхности земли автомашиной. Датчик представляет собой зонд длиной 38 см с парафиновым и бор-кадмиевыми разделительными экранами для обеспечения направленности приема нейтронного излучения. В установке применяют довольно мощный Po-Be источник с выходом  $10^7$  нейтр/с, а для регистрации нейтронов используют борный пропорциональный детектор. Глубинность исследований составляет 15–25 см.

*Пешеходный вариант* применяют для исследования участков, не доступных для автомобиля и опробования горных выработок. В этом случае используют зонд длиной 18 см с двумя борными детекторами и нейтронным источником с выходом  $3-10^4$  нейтр/с. Порог определения  $B_2O_3$  равен 0,01 %. Верхний предел определения концентрации В – 0,7 %  $B_2O_3$  для обоих приборов, так как при более высоких концентрациях скорость счета нейтронов очень низкая.

Перед измерениями прибор любого типа градуируют на искусственно приготовленных пластах мощностью 30–40 см с известной концентрацией  $B_2O_3$  и на породе, заведомо не содержащей В. По полученным данным строят градуировочный график зависимости относительной скорости счета нейтронов  $N/N_0$  (за  $N_0$  принимают скорость счета в пустой породе) от концентрации  $B_2O_3$ .

### 4.3 Нейтронный гамма-метод (НГМ)

Основан на регистрации  $\gamma$ -излучения, возникающего при радиационном захвате нейтронов ядрами элементов.

Различают два варианта нейтронного гамма-метода:

1) интегральный (**НГМи**) метод, где регистрируется интегральный поток  $\gamma$ -излучения; он и решает практически те же задачи, что и нейтрон-нейтронные методы;

2) спектрометрический (**НГМс**), когда исследуется (анализируется) спектр  $\gamma$ -излучения; по своим возможностям он более универсален, чем **ННМ**, и решает большой круг задач, в частности, при изучении содержания химических элементов.

Основное применение метод **НГМ** получил в скважинном варианте. Поток  $\gamma$ -излучения, регистрируемый детектором на некотором удалении от точечного источника нейтронов, зависит от замедляющих свойств химических элементов, захвативших медленные нейтроны.

Причем возможность анализа пород и руд по  $\gamma$ -излучению радиационного захвата нейтронов определяется различиями величин сечения захвата нейтронов и индивидуальным характером спектров  $\gamma$ -излучения образующихся изотопов химических элементов.

Среди элементов, характеризующихся высокими сечениями захвата ( $\sigma_{\text{захв.}} > 6-7 \text{ МэВ}$ ), выделяются три группы:

1 Имеющие интенсивные  $\gamma$ -линии в жесткой части спектра Cl, Al, Fe, Ti, Mn, Ni, Cu и др.

2 Интенсивные  $\gamma$ -линии в средней части спектра (3–6 МэВ), такие как Ca, Si и др.

3 Наиболее обширную, для которой характерно наличие в спектре  $\gamma$ -излучения интенсивных  $\gamma$ -линий в относительно мягкой (менее 2–3 МэВ) – H, In, Cs.

Оценка содержаний различных элементов производится на основе изучения интенсивности  $\gamma$ -излучения в соответствующих частях спектра и последующего сопоставления с данными градуирования.

### 4.4 Нейтронный активационный метод (НАМ)

Метод основан на измерении наведенной активности искусственных радиоактивных нуклидов, образующихся при облучении горных пород нейтронами.

В нейтронном активационном методе различают активацию тепловыми и быстрыми нейтронами. Образующийся радионуклид характеризуется определенным периодом полураспада, видом и энергией излучения, что используют для идентификации элементов, входящих в горную породу.

Активация тепловыми нейтронами происходит по реакции  $(n, \gamma)$ . Значительный активационный эффект наблюдается при активации  $\text{Na}^{23}$ ,  $\text{Al}^{27}$ ,  $\text{Cl}^{37}$ ,  $\text{Mn}^{55}$ ,  $\text{Cu}^{63}$ ,  $\text{Cu}^{65}$ .

Активация быстрыми нейтронами осуществляется по реакциям  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, 2n)$ , имеющим пороговый характер, т. е. происходящим при энергии  $E_n > 1 \text{ МэВ}$ . Наиболее доступны для активации быстрыми нейтронами:  $\text{Fe}^{19}$ ,  $\text{Si}^{28}$ ,  $\text{P}^{31}$ .

Наведенная активность образца или горной породы  $A_t$ , которую регистрирует прибор в процессе измерений, определяется массой анализируемого нуклида  $m$ , потоком активизирующего излучения  $\Phi$ , макроскопическим сечением активации  $\Sigma$  и временем активации  $t_a$ :

$$A_t = \Phi \cdot \Sigma \cdot m \cdot (1 - e^{-\lambda t}),$$

где  $\lambda$  – постоянная распада активированного радионуклида.

Макроскопическое сечение активации можно получить из выражения (в  $\text{см}^2/\text{г}$ ):

$$\Sigma = \frac{\sigma_a \cdot f \cdot N_a}{A},$$

где  $\sigma_a$  – сечение реакции, т. е. вероятность реакции, в результате которой образуется радионуклид;

$f$  – доля активизируемых атомов в естественной смеси нуклидов;

$N_a$  – число Авогадро ( $6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ );

$A$  – массовое число.

В общем виде формула изменения наведенной активности определяется следующим выражением:

$$A_t = A_\infty \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \cdot x \cdot e^{-\lambda t}.$$

Зависимость наведенной активности от  $T_{1/2}$  радионуклида позволяет уменьшить влияние мешающих нуклидов, присутствующих в образце или породе, выбором соответствующего времени активации.

## Вопросы для самоконтроля

- 1 Какие источники нейтронов используются в ядерно-физических методах?
- 2 На чем основано применение нейтрон-нейтронных методов в ядерной геофизике?
- 3 Какие задачи решаются нейтрон-нейтронными методами?
- 4 В чем заключается сущность нейтронного гамма-метода?
- 5 Какие существуют варианты нейтронного гамма-метода?
- 6 На чем основано применение нейтронного активационного метода в ядерной геофизике?

## 5 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- 5.1 Источники радиоактивного облучения и их воздействие на человека.
- 5.2 Нормы радиационной безопасности.
- 5.3 Основные правила работы с радиоактивными источниками.
- 5.4 Радиационная безопасность при работе с радиоактивными рудами и радиевыми источниками.

### 5.1 Источники радиоактивного облучения и их воздействие на человека

В ядерной геофизике используются как *закрытые* (запаянные в ампулы) источники бета-гамма-излучения и нейтронов, так и *открытые* бета- и гамма-препараты.

*Закрытый источник* – радиоактивный источник излучения, устройство которого исключает поступления содержащихся в нем радиоактивных веществ в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан.

*Открытый источник* – радиоактивный источник излучения, при использовании которого возможно поступление содержащихся в нем радиоактивных веществ в окружающую среду.

Облучение организма ионизирующими веществами подразделяется на *внешнее и внутреннее*.

*Внешнее облучение* – облучение организма ионизирующим излучением, приходящим извне.

*Внутреннее облучение* – облучение организма, отдельных органов и тканей ионизирующим излучением, испускаемым содержащимися в них радионуклидами.

Таким образом, радиоактивные вещества могут попасть как на кожные покровы, так и во внутрь, поэтому при работе с источниками радиоактивного излучения следует строго соблюдать технику безопасности и санитарные правила.

Помимо этого, небрежная работа с радиоактивными веществами может привести к загрязнению как рабочего места лабораторий, так оборудования и аппаратуры, используемой в исследованиях, что существенно снижает точность получаемых результатов исследований.

Опасность биологического воздействия излучения на организм усугубляется тем обстоятельством, что даже при высокой дозе излучения, действие его ощущается не сразу, а спустя некоторое время после облучения.

При первичном облучении в организме происходят те же явления, что и при поглощении излучения в веществе (ионизация атомов и молекул живой ткани, а также расщепление молекул). Следствием этого является изменение химической структуры различных соединений, а следовательно, и состава ткани, что, в свою очередь, приводит к гибели клеток. В зависимости от дозы облучения эти процессы могут быть *обратимыми* и *необратимыми*. Если ткань способна воссоздать функционирующие элементы, то клетки могут восстановиться. При сильном облучении способность ткани к самовосстановлению может исчезнуть, и организм погибает. Соблюдение правил техники безопасности, санитарных норм и выбор правильного режима работы с радиоактивными веществами позволяет свести облучение к достаточно малым дозам, не вызывающим болезненных изменений в организме.

Изменения, происходящие в теле человека под воздействием ядерных излучений, связаны с поглощенной организмом энергией и, как правило, пропорциональны ей. Это значит, что степень вредного действия зависит от поглощенной дозы облучения. Однако поглощенная доза не учитывает степень опасности различных видов излучений. Для этих целей используют понятие *эквивалентной дозы*, которая представляет собой поглощенную дозу, умноженную на коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма. Единицей *эквивалентной Дозы* в системе СИ является *Зиверт (Зв)* внесистемная единица *Бэр*. *Зиверт* – доза любого вида излучения, производящая такое же биологическое действие, как и доза рентгеновского или  $\gamma$ -излучения в  $1 \text{ Гр}$ ,  $1 \text{ Зв} = 100 \text{ Бэр}$ .

## 5.2 Нормы радиационной безопасности

Для обеспечения радиационной безопасности при проведении работ с источниками ядерных излучений проводят дозиметрический контроль, основанный на нормах радиационной безопасности (НРБ).

НРБ – основаны на следующих основных принципах радиационной безопасности:

- не превышения установленного основного дозового предела, исключение всякого необоснованного облучения,
- снижения дозы до возможно низкого уровня.

Нормами радиационной безопасности регламентированы:

1) три категории облучаемых лиц и три группы критических органов:

- категория А – персонал;
- категория Б – ограниченная часть населения;
- категория В – население области, края, республики, страны;
- I группа – все тело, гонады, красный костный мозг;
- II группа – мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталик глаза и другие органы, за исключением тех, которые относятся к группам I и III;
- III группа – кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, голени и стопы.

2) Основные дозовые пределы – предельно допустимые соматические дозы ПДД внешнего и внутреннего облучения персонала (категория А) за календарный год и пределы дозы ПД внешнего и внутреннего облучения лиц категории Б за календарный год приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные дозовые пределы суммарного внешнего и внутреннего облучения ( $mZв/год$ )

Категории облучаемых лиц	Группа критических органов		
	I	II	III
Категория А	50	150	300
Категория Б	5	15	30

3) коэффициент качества различных излучений при хроническом облучении всего тела (таблица 2).

Эквивалентная доза облучения персонала не должна превышать ПДД за год, указанной в таблице 2, а доза, накопленная к возрасту 30 лет, не должна превышать 12 ПДД для уменьшения вероятности генетических последствий. Лица моложе 18 лет к работе с излучением не допускаются.

Таблица 2 – Коэффициент качества различных излучений при хроническом облучении всего тела

Вид излучения	К	Вид излучения	К
Рентгеновское и $\gamma$ -излучение	1	Нейтроны с энергией 0,1–10 МэВ	10
Электроны и позитроны, $\beta$ -излучение	1	$\alpha$ -излучение с энергией меньше 10 МэВ	20
Нейтроны с энергией меньше 20 КэВ	3	Тяжелые ядра отдачи	20

Для обеспечения радиационной безопасности работников необходимо проводить различные предохранительные мероприятия. Защита от внутреннего облучения заключается в аккуратном проведении работ с соблюдением правил техники безопасности и использованием средств индивидуальной защиты. Защита от внешнего облучения достигается следующими способами: увеличением расстояния до источника излучения; уменьшением времени облучения; снижением активности применяемого источника излучения; применением экранов, защитных приспособлений, правильной организации труда.

Для защиты от  $\gamma$ -излучения применяют свинец и бетон, для нейтронной защиты используют воду и парафин (для замедления быстрых нейтронов), бор и кадмий (поглощают тепловые нейтроны).

Толщину защитных экранов рассчитывают по таблицам и номограммам.

### 5.3 Основные правила работы с радиоактивными источниками

При работе с различными радиоактивными препаратами необходимо руководствоваться санитарными правилами и отраслевыми инструкциями и придерживаться следующих основных правил.

1 Без необходимости не подвергаться действию излучения и, в частности, не приближаться к источникам гамма-излучения и нейтронов.

2 Операции по извлечению источников излучения из контейнеров и при помещении их в контейнеры необходимо сводить до минимума. Аналогичным образом следует поступать и при установке источников в датчиках или в глубинных приборах и при извлечении из них источников. Желательно пользоваться при этом специальным рабочим инструментом (различного рода щипцами и манипуляторами).

3 Предохранять ампулы источников излучения от всевозможных воздействий, способных привести к нарушению их герметичности. Особенно это следует соблюдать при обращении с полоний-бериллиевыми источниками нейтронов. Надо помнить, что полоний летуч и ядовит.

4 При работе с открытыми радиоактивными препаратами ни в коем случае не следует их рассыпать или разливать. Надо помнить, что загрязнение радиоактивными веществами опасно для здоровья и для проведения работ.

5 В помещениях, где ведутся работы с открытыми источниками излучения, нельзя ни пить, ни есть, ни курить. Это может привести к попаданию радиоактивных веществ внутрь организма.

6 Работы со значительными количествами открытых радиоактивных веществ (свыше одного *микрокюри*) следует проводить в специальных помещениях, где имеется тяга. При этом необходимо пользоваться халатами и перчатками.

7 Проверять при помощи дозиметрической аппаратуры мощность доз на рабочих местах и степень их загрязнения.

8 Радиоактивные отходы сбрасывать в специальные устройства и затем закапывать в отведенных для этого местах.

9 Особые меры предосторожности следует соблюдать при работе на скважинах по методу изотопов.

## **5.4 Радиационная безопасность при работе с радиоактивными рудами и радиевыми источниками**

Степень воздействия радионуклидов на организм человека определяется дозой полученного излучения.

Персонал, занятый на геолого-геофизических работах с радиоактивными рудами и радиевыми источниками  $\gamma$ -излучения, получает внешнее и внутреннее облучение. Радиационно-опасным фактором для человека является и присутствие в воздухе радона и продуктов его распада.

Для обеспечения радиационной безопасности при проведении работ с радиоактивными рудами и радиевыми источниками  $\gamma$ -излучения проводят радиационный (дозиметрический) контроль, основанный на действующих в данный момент нормах радиационной безопасности (НРБ).

При работе в лабораторных условиях персонал получает внешнее  $\gamma$ -излучение от радиоактивных руд и внутреннее при попадании внутрь организма радиоактивной пыли.

При работе в горных выработках персонал получает внешнее  $\gamma$ -излучение от радиоактивных руд и внутреннее от радиоактивной пыли и радона, попавших внутрь организма.

Радиевые источники, применяемые для градуировки радиометров, используют только в закрытом виде, поэтому они оказывают на персонал только внешнее излучение.

При работе в лабораторных условиях не требуется радиационный контроль, если активность равновесного урана на рабочем месте не превышает  $3,7 \cdot 10^5 \text{ Бк}$ , т. е. масса урана составляет не более 2,1 г, а общая активность в лаборатории при этом не превышает  $3,7 \cdot 10^6 \text{ Бк}$ .

Для персонала, непосредственно работающего с радиоактивными источниками, установлена годовая предельно допустимая доза (ПДД) облучения 5 Бэр.

За допустимую, принята концентрация радона (без дочерних продуктов) в воздухе 55,5 Бк/л, а предельно допустимое поступление радона в организм человека составляет  $1,4 \cdot 10^8 \text{ Бк/год}$ .

Дочерние продукты распада радона существуют в виде свободных атомов либо сорбируются на аэрозольных частицах. Энергию, выделяющуюся при распаде дочерних продуктов радона, называют *скрытой энергией*. Скрытая энергия дочерних продуктов радона, равновесная с радоном с удельной активностью 1 Бк/л, составляет  $3,46 \cdot 10^4 \text{ МэВ/л}$ .

Допустимую концентрацию продуктов распада радона, выраженную в единицах скрытой энергии, принимают равной  $3,8 \cdot 10^4 \text{ МэВ/л}$ .

Предельно допустимое поступление продуктов распада радона в единицах скрытой энергии равно  $9,6 \cdot 10^{10} \text{ МэВ/год}$ .

Дозиметрический контроль в воздухе горных выработок ведут по измерениям скрытой энергии продуктов распада радона.

## Вопросы для самоконтроля

- 1 Что является основными источниками радиоактивного облучения?
- 2 Какие виды облучения организма ионизирующими веществами вы знаете?
- 3 Что такое нормы радиационной безопасности?
- 4 Сколько категорий облучаемых лиц определяются нормами радиационной безопасности?
- 5 Перечислите основные правила работы с радиоактивными источниками.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Арцыбашев, В. А. Ядерно-геофизическая разведка / В. А. Арцыбашев. – М. : Недра, 1980. – 247 с.
- 2 Ларионов, В. В. Ядерная геофизика и радиометрическая разведка / В. В. Ларионов, Р. А. Резванов. – М. : Недра, 1990. – 316 с.
- 3 Новиков, Г. Ф. Радиометрическая разведка : учебник для вузов / Г. Ф. Новиков. – Л. : Недра, 1989. – 418 с.
- 4 Пруткин, М. И. Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу / М. И. Пруткин, В. Л. Шишкин. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.

Производственно-практическое издание

**Верутин Михаил Григорьевич,  
Кобрусева Ольга Николаевна**

**ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ:  
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ**

Практическое руководство

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

Подписано в печать 08.07.2021. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,8.

Тираж 25 экз. Заказ 406.

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





