

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

М. Г. ВЕРУТИН, О. Н. КОБРУСЕВА

**ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ:
ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПОЛЕВЫЕ
РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ 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: лабораторные и полевые радиометрические методы : практическое руководство / М. Г. Верутин, О. Н. Кобрусева ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – 44 с.
ISBN 978-985-577-756-5

Практическое руководство рассматривает методы регистрации ионизирующих излучений, принципы работы радиометрических, спектрометрических и эманационных приборов, основные характеристики различных детекторов ионизирующих излучений, лабораторные радиометрические методы анализа твердых и жидких проб и методику полевых радиометрических методов.

Издание 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 978-985-577-756-5

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
1 Методы регистрации радиоактивных излучений.....	5
1.1 Принцип работы и блок-схема радиометрических приборов.....	5
1.2 Ионизационный метод регистрации излучений.....	7
1.3 Сцинтилляционный метод регистрации.....	9
1.4 Основные характеристики детекторов ионизирующих излучений.....	10
1.5 Классификация приборов для измерений радиоактивности.....	11
2 Лабораторные радиометрические методы анализа.....	13
2.1 Бета-анализ твердых проб.....	15
2.2 Гамма-анализ твердых проб.....	15
2.3 Лабораторный бета-гамма-анализ твердых проб.....	17
2.4 Спектрометрический гамма-анализ.....	18
2.5 Анализ по эманациям.....	20
3 Полевые радиометрические методы исследования горных пород в условиях их естественного залегания.....	23
3.1 Классификация методов.....	23
3.2 Основные поисковые признаки радиометрических методов.....	24
3.3 Пешеходная гамма-съемка.....	25
4 Спектрометрическая гамма-съемка.....	28
4.1 Физические и геохимические основы гамма-спектрометрии....	28
4.2 Принцип отдельного определения U(Ra), Th, и K.....	29
4.3 Модификации полевой гамма-спектрометрии.....	31
5 Эманационная съемка.....	34
5.1 Сущность эманационной съемки.....	34
5.2 Способы регистрации альфа-излучения радона при съемке.....	35
5.3 Методика эманационной съемки с отбором проб воздуха.....	37
5.4 Методика проведения трековой съемки.....	40
5.5 Применение эманационной съемки.....	42
Литература.....	44

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».

Практическое руководство рассматривает методы регистрации ионизирующих излучений, принципы работы радиометрических, спектрометрических и эманационных приборов, основные характеристики различных детекторов ионизирующих излучений, лабораторные радиометрические методы анализа твердых и жидких проб и методику полевых радиометрических методов (гамма-, спектрометрическая и эманационная съемки).

Издание будет способствовать студентам в изучении принципов работы радиометрических приборов, освоении методических основ проведения лабораторных исследований, методики проведения полевых радиометрических работ и интерпретации полученных полевых и лабораторных данных, и в конечном итоге, решении геологических и технологических задач.

Практическое руководство «Ядерно-геофизические методы исследований: лабораторные и полевые радиометрические 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 МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

- 1.1 Принцип работы и блок-схема радиометрических приборов.
- 1.2 Ионизационный метод регистрации излучений.
- 1.3 Сцинтилляционный метод регистрации.
- 1.4 Основные характеристики детекторов ионизирующих излучений.
- 1.5 Классификация приборов для измерений радиоактивности.

1.1 Принцип работы и блок-схема радиометрических приборов

В ядерной геофизике для измерения потока радиоактивных излучений, определения энергетического спектра излучений и изучения радиоактивности газов применяются специальные приборы, которые соответственно носят название *радиометров, спектрометров и эманометров*.

Принципы работы всех приборов для регистрации ионизирующих излучений основаны на эффектах взаимодействия ионизирующих излучений с веществом.

Принципиальные схемы большинства приборов сходны. Любой прибор для измерения ионизирующего излучения состоит из *детектора, усилителя, формирующего каскада* для придания стандартной прямоугольной формы импульсам, *интегрирующей ячейки* для преобразования последовательности импульсов в постоянный ток, который пропорционален числу импульсов в единицу времени, *регистрирующего устройства*, блока питания.

Блок-схема измерительной части радиометров приведена на рисунке 1.

Детекторы излучения – это устройства, преобразующие энергию излучения в другие виды энергии, удобные для регистрации.

Детекторы, применяемые в радиометрических приборах, различают: а) по принципу действия, т. е. по эффекту, используемому для преобразования энергии излучения; б) по состоянию среды, в которой происходит эффект от действия излучения.

По принципу действия детекторы делят на ионизационные и сцинтилляционные. Ионизационные детекторы основаны на ионизирующей способности излучений, сцинтилляционные – на преобразовании фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) световых вспышек (сцинтилляций), возникающих в люминофорах от воздействия излучений, в электрические импульсы.



Рисунок 1 – Блок-схема радиометра

По состоянию среды ионизационные детекторы подразделяют на газовые, жидкостные и твердотельные. К газовым детекторам относят ионизационные камеры, пропорциональные и газоразрядные счетчики Гейгера-Мюллера; к твердотельным – полупроводниковые, среди которых наибольшее распространение получили детекторы из германия.

Импульсы с детектора излучения обычно поступают в усилитель. Для устойчивой регистрации всех импульсов в схему включают формирующий каскад (нормализатор). При поступлении импульса на вход формирующего каскада на его выходе независимо от формы и амплитуды входного импульса образуется импульс прямоугольной формы со стандартной амплитудой и длительностью.

Поскольку после нормализатора все импульсы имеют стандартную форму, то средний электрический ток, обусловленный этими импульсами, пропорционален числу импульсов в единицу времени, называемому также скоростью счета. Для сглаживания пульсаций тока, т. е. преобразования последовательности импульсов в постоянный ток, сила которого пропорциональна частоте поступления импульсов, служит интегрирующая ячейка (интегратор).

Ток с выхода интегратора, пропорциональный скорости счета, поступает на регистратор.

В спектрометрических приборах между усилителем и формирующими каскадами включается специальный блок – амплитудный дискриминатор, пропускающий лишь импульсы, амплитуда которых превышает некоторый заданный уровень (порог). Введение дискриминатора с регулируемым порогом позволяет пропускать полезные сигналы, обусловленные попаданием ядерного излучения в счетчик, и задерживать небольшие шумовые импульсы, возникающие в детекторах.

Кроме описанных элементов, каждый радиометр содержит общий блок питания (батарея сухих элементов или выпрямители переменного тока с электронным стабилизатором напряжения).

1.2 Ионизационный метод регистрации излучений

Ионизационный метод регистрации излучений основан на ионизирующем действии излучений. Под действием любого ионизирующего излучения в веществе (газе) из нейтральных атомов или молекул образуются ионы – частицы, несущие положительные или отрицательные электрические заряды, которые затем и регистрируются. Наиболее подвижны ионы в газе, и в электрическом поле они довольно быстро перемещаются к соответствующим электродам, поэтому ионизационные детекторы выполняют в виде баллона с двумя электродами, заполненным газом.

Газ, заполняющий пространство в камере, является изолятором, но под действием ионизирующих частиц становится проводником. В нем появляются свободные электроны, положительные и отрицательные ионы, которые под действием разности потенциалов, приложенной к электродам, устремляются к соответствующим электродам – и в результате возникнет электрический ток, который может быть зафиксирован чувствительным прибором, включенным в цепь между электродами камеры.

Зависимость ионизационного тока в камере от разности потенциалов на ее электродах показана на рисунке 2. Возрастание тока на участке I обусловлено наличием диффузии и рекомбинации ионов. Ток в камере возрастает до тех пор, пока все ионы не попадут к ее электродам. Дальнейшее увеличение разности потенциалов не приводит к возрастанию тока, т. е. наступает насыщение тока, соответствующее участку II. При последующем увеличении разности потенциалов ток вновь возрастает за счет ионизации молекул газа электронами (происходит вторичная ионизация газа). В результате этого количество ионов возрастает лавинообразно и происходит так называемое газовое усиление. Это продолжается до тех пор, пока не произойдет пробой конденсатора (участки III, IV и V).

В зависимости от того, какая область вольтамперной характеристики используется для работы, ионизационные детекторы делятся на *ионизационные камеры, пропорциональные счетчики и газоразрядные счетчики*.

Ионизационные камеры работают в области тока насыщения. *Пропорциональные счетчики* работают в области газового усиления. *Газоразрядные счетчики* работают в области самостоятельного разряда.

При измерении α -активности препарат вводят внутрь камеры, что исключает потери энергии α -частицами при прохождении через окна камер, закрытые тонкой пленкой. Измерение β -активности осуществляется при помещении препарата снаружи окна камеры, закрытого калькой или восковой. По величине интенсивности регистрируемого α - или β -излучения можно судить о концентрации радиоактивного препарата в пробе, а по ве-

личине спада интенсивности излучения в зависимости от расстояния между источником и камерой – о его природе.



Рисунок 2 – Зависимость электрического тока в газе от напряжения на электродах камеры (ВАХ)

Интенсивность гамма-излучения измеряется при помощи закрытых камер с высоким давлением газа (для повышения эффективности).

Заполнение камер трехфтористым бором BF_3 позволяет осуществлять регистрацию нейтронов.

Разновидностью ионизационных детекторов являются *полупроводниковые детекторы*. Полупроводниковый детектор работает подобно ионизационной камере с тем отличием, что ионизация происходит не в газовом промежутке, а в толще кристалла полупроводника. То есть основным элементом полупроводникового детектора является кристалл полупроводника. Полупроводниковый детектор представляет собой полупроводниковый анод, на который подано обратное (запирающее) напряжение (100 В). Слой полупроводника вблизи границы *p-n-перехода* обеднен носителями тока (электронами проводимости и дырками) и обладает высоким удельным электрическим сопротивлением. Заряженная частица, проникая в него, создает дополнительные неравновесные электронно-дырочные пары, которые под действием электрического поля «рассасываются», перемещаясь к электродам полупроводникового детектора. В результате во внешней цепи полупроводникового детектора возникает электрический импульс, который далее усиливается и регистрируется.

1.3 Сцинтилляционный метод регистрации

Сцинтилляционный метод основан на способности некоторых веществ называемых люминофорами, испускать световые вспышки (сцинтилляции) под действием ионизирующего излучения. Таким образом, *сцинтилляционный детектор* состоит из сцинтиллятора 1, в котором частицы вызывают вспышку люминесценции, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), преобразующего световую вспышку в импульс электрического тока и состоящего из катода 2, фокусирующего устройства 3, динодов 4, анода 5 (рисунок 3). Положительное напряжение на диноды подается с делителя сопротивлений, подключенного к источнику питания. Напряжение на каждый последующий динод увеличивается – и максимальное напряжение, равное напряжению источника питания, подается на анод. На катод подается отрицательная полярность напряжения.

В сцинтилляционном счетчике ФЭУ работает в импульсном режиме. Под действием светового импульса, возникшего в сцинтилляторе, из фотокатода за счет фотоэффекта выбиваются электроны, которые собираются электрическим полем и направляются на первый динод, ускоряясь до энергии, достаточной для выбивания вторичных электронов из следующего динода.

Умножение числа электронов происходит при попадании потока первичных электронов на динод. Выбитые при ударе электроны фокусируются на последующий динод, из которого они вновь выбивают примерно удвоенное количество электронов, и т. д. Таким образом, лавина электронов возрастает от катода к аноду, происходит преобразование очень слабых световых вспышек, возникающих в сцинтилляторе, в регистрируемые электрические импульсы.

По составу сцинтилляторы делятся на неорганические и органические, а по агрегатному состоянию – на *твердые, пластические, жидкие и газовые*.

Из неорганических сцинтилляторов для регистрации β - и γ -излучений удобно использовать йодистый натрий (цезий), активированный талием NaI(Tl) , а также вольфрам кальция – CaWO_4 , поскольку они могут быть получены в виде больших прозрачных монокристаллов. Для регистрации нейтронов применяют сцинтилляторы из йодистого лития – LiI(Sn) , а тяжелых частиц (α -частиц, осколков деления) – сцинтилляторы на основе сернистого цинка (кадмия), активированного серебром ZnS(Ag) .

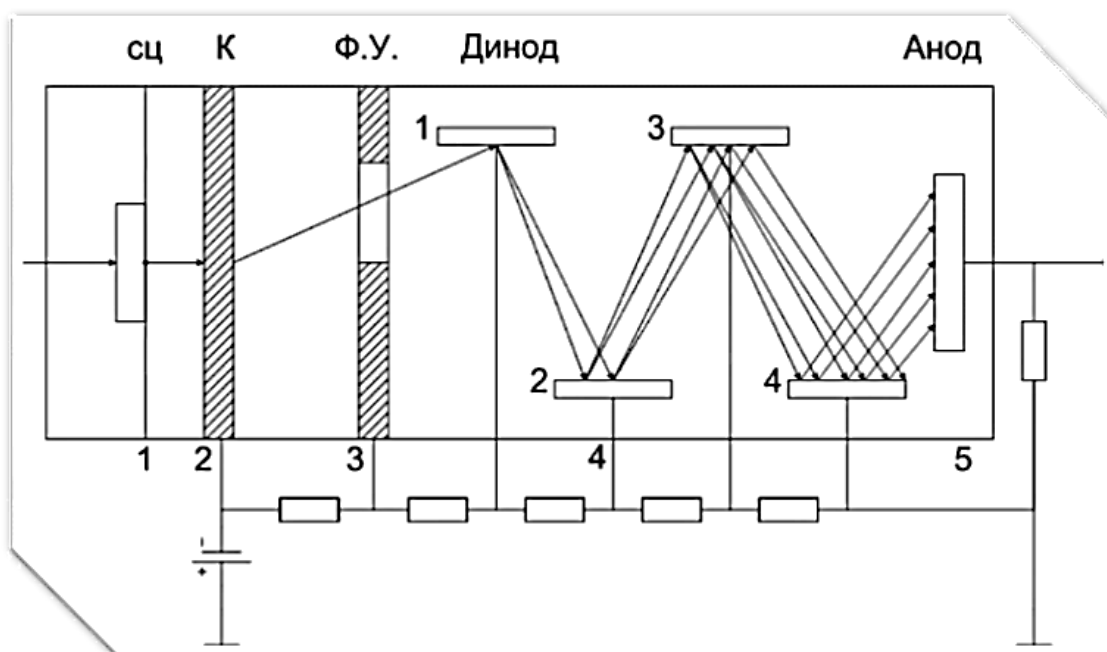


Рисунок 3 – Сцинтилляционный детектор

1.4 Основные характеристики детекторов ионизирующих излучений

Основными характеристиками детекторов являются: *эффективность регистрации, чувствительность, счетная характеристика, уровень собственного фонового излучения, разрешающее время и энергетическое разрешение.*

Эффективность регистрации ε – это отношение количества зарегистрированных сигналов к количеству частиц или квантов, падающих на детектор:

$$\varepsilon = \frac{J_3}{\varphi \cdot S},$$

где J_3 – частота импульсов от излучения;

φ – плотность потока частиц или квантов;

S – площадь чувствительной поверхности детектора.

Эффективность регистрации излучений газоразрядным счетчиком не зависит от его размеров.

Эффективность регистрации γ -излучения сцинтилляционными детекторами зависит от эффективного атомного номера материала сцинтилля-

тора и от его размеров и составляет десятки процентов. С увеличением размеров сцинтилляторов их эффективность возрастает, особенно по отношению к высокоэнергетическому γ -излучению.

Полупроводниковые детекторы (ППД) обладают малой эффективностью регистрации, так как они имеют небольшой объем чувствительной зоны.

Чувствительность детектора η – это отношение частоты зарегистрированных импульсов или силы тока к плотности потока частиц или квантов:

$$\eta = \frac{J_z}{\Phi} \text{ или } \eta = \frac{I}{\Phi}$$

Чувствительность детектора связана с его эффективностью соотношением

$$\eta = \varepsilon \cdot S.$$

Счетная характеристика детектора – это зависимость частоты импульсов от напряжения, подаваемого на катод газоразрядного счетчика или на ФЭУ сцинтилляционного детектора.

Разрешающее время детектора τ – это минимальный интервал времени между двумя отдельно зарегистрированными сигналами.

Энергетическое разрешение – эта характеристика присуща спектрометрическим приборам, под ним понимают способность детектора отдельно регистрировать близкие по энергетическому спектру линии. Разрешение детектора определяют по аппаратурному спектру сцинтилляций на выходе детектора. Численно энергетическое разрешение, выраженное в процентах, характеризуют отношением ширины фотопика от моноэнергетического источника на половине высоты к энергии источника.

1.5 Классификация приборов для измерений радиоактивности

По условиям использования и назначению радиометры подразделяют на *лабораторные* (стационарные), *полевые* (пешеходные), *автомобильные*, *авиационные*, *скважинные* (каротажные), *рудничные* и т. д.

Лабораторные радиометры должны обладать высокой чувствительностью и стабильностью. Требования к габаритам, массе и потребляемой энергии для них не слишком жесткие.

Полевые радиометры и эманометры должны быть по возможности компактными и легкими. К их надежности предъявляются повышенные требования. Полевые радиометры состоят из двух блоков, соединенных между собой кабелем: выносного зонда (детектор, усилитель, дискриминатор и источник высокого напряжения) и пульта управления, содержащего усилительно-регистрирующие схемы и источники питания.

Наиболее распространенным является радиометр типа СРП (СРП-68, СРП-88, СРП 97 и СРП-20) с сцинтилляционным счетчиком. Серийно выпускаются пешеходная и каротажная версии, которые отличаются конструкцией корпуса блока детектирования.

Полевые эманометры служат для определения концентрации эманации в почвенном воздухе при эманационной съемке и концентрации радона в пробах вод. Для определения концентраций эманации в лабораторных условиях выпускается лабораторный вариант эманометра.

Эманометр (рисунок 4) состоит из пробоотборника 1, поршневого насоса 2, сцинтилляционной камеры 3, измерительного пульта 4 и соединительных резиновых трубок 5.

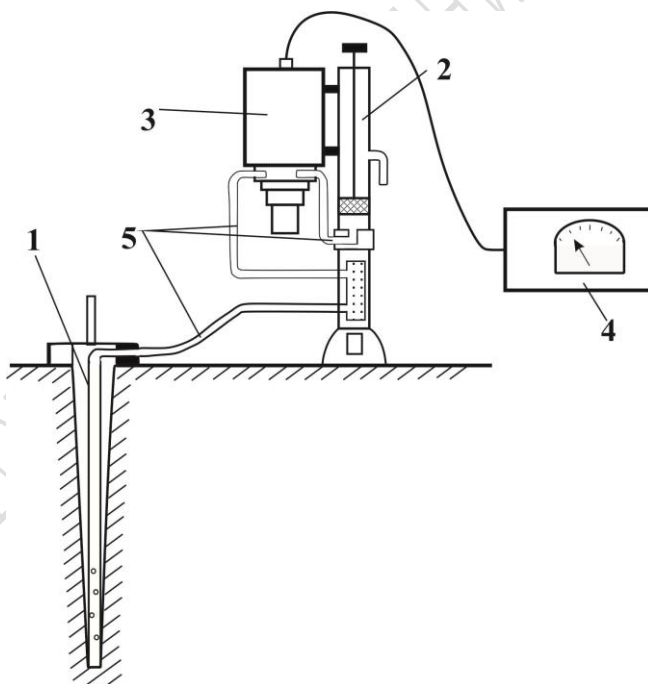


Рисунок 4 – Схема (а) и верхняя панель пульта управления (б) эманометра ЭМ-6П

Для заполнения камеры почвенным воздухом пробоотборник вставляют в шпур (бурку), пробитый при помощи стального лома или бура, и производят прокачку воздуха насосом (пять-шесть качаний). После этого закрывают краны на входе и выходе камеры и переходят к измерению активности воздуха.

Авиационные радиометры должны обладать высокой чувствительностью, малой инерционностью и непрерывной записью интенсивности γ -излучения. Высокая чувствительность достигается применением больших сцинтилляторов или даже нескольких сцинтилляционных счетчиков.

В скважинных радиометрах датчики помещают в герметический кожух, способный выдержать давление буровой жидкости на забое скважины.

Гамма-спектрометры применяются для исследования спектра излучения или в простейшем случае для избирательной регистрации γ -квантов в определенной области энергии.

Вопросы для самоконтроля

- 1 На чем основан принцип работы приборов для измерения ионизирующих излучений?
- 2 Что такое детектор излучения?
- 3 Какие бывают детекторы по принципу действия?
- 4 Из каких блоков состоит радиометр?
- 5 В чем суть ионизационного метода регистрации ионизирующих излучений?
- 6 В чем суть сцинтилляционного метода регистрации ионизирующих излучений?
- 7 В чем суть трекового метода регистрации ионизирующих излучений?
- 8 Перечислите основные характеристики детекторов излучений.
- 9 Из каких компонент состоит сцинтилляционный детектор?

2 ЛАБОРАТОРНЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА

- 2.1 Бета-анализ твердых проб.
- 2.2 Гамма-анализ твердых проб.
- 2.3 Лабораторный бета-гамма-анализ твердых проб.
- 2.4 Спектрометрический гамма-анализ.
- 2.5 Анализ по эманациям.

Лабораторные радиометрические методы анализа применяют для определения в пробах горных пород и радиоактивных руд массовой доли радионуклидов.

Все лабораторные методы классифицируют в зависимости от регистрируемого вида излучения и по способу регистрации. По первому признаку различают альфа-, бета- и гамма-методы, по второму – интегральные и спектрометрические.

При интегральном методе регистрируется суммарный ионизационный ток, вызываемый излучением, в спектрометрическом – производится счет числа частиц, зарегистрированных детектором.

Исследуемые порошковые пробы и эталоны обычно насыпают в специальные кассеты, форма которых определяется формой детектора излучения. По соотношению между толщиной образца и длиной пробега регистрируемых частиц различают *тонкий*, *промежуточный* и *насыщенный* (толстый) слой.

Тонким для данного излучения является слой, толщина которого значительно меньше длины пробега частиц, и потому ослабление излучения в самом образце пренебрежимо мало.

Насыщенным является слой, толщина которого столь велика, что дальнейшее ее увеличение не приводит к росту потока излучения через его поверхность, обращенную к детектору. Результаты измерений с насыщенными слоями не зависят от колебаний толщины образца.

Определение концентрации изотопа непосредственно по показаниям прибора (по величине тока ионизационной камеры или числа импульсов от счетчика) из-за влияния на процесс измерения многих, трудно учитываемых факторов, как правило, дает низкую точность. Поэтому при геологических исследованиях широко используется относительный метод измерений. Суть этого метода сводится к сравнению результатов измерений излучений от исследуемой пробы и эталонного образцов. Если измерения излучения исследуемой пробы J_n и эталонного образца $J_э$ проводятся строго в идентичных условиях, то соответствующие показания прибора будут пропорциональны концентрациям радиоактивного изотопа:

$$\frac{J_n}{J_э} = \frac{C_n}{C_э}.$$

Отсюда концентрация изотопа в исследуемой пробе:

$$C_n = J_n \cdot \frac{C_э}{J_э}.$$

2.1 Бета-анализ твердых проб

Бета-анализ применяют главным образом как составную часть бета-гамма-анализа, но он может быть использован и как самостоятельный метод анализа *равновесных неземанирующих урановых руд на уран (радий)*.

Непосредственно измерить частоту импульсов только от β -излучения нельзя, так как детекторы излучений одновременно с β -излучением регистрируют и часть γ -квантов. Поэтому частоту импульсов от β -излучения рассчитывают как разность из результатов двух замеров пробы: открытой ($\beta + \gamma$ -излучения) и через фильтр, поглощающий β -излучение, т. е.

$$J_{\beta} = J_{\beta+\gamma} - \eta \cdot J_{\gamma},$$

где $J_{\beta+\gamma}$ – частота импульсов от суммарного $\beta+\gamma$ -излучения, *имп/мин*;

J_{γ} – частота импульсов от γ -излучения, *имп/мин*;

η – коэффициент, учитывающий поглощение γ -излучения в фильтре и равный примерно 1,1;

J_{β} – частота импульсов от β -излучения, *имп/мин*.

Массовую долю урана в пробе рассчитывают по формуле

$$C_{\beta} = C_{\beta}^{cm} \cdot \frac{J_{\beta}^{np} - J_{\phi}}{J_{\beta}^{cm} - J_{\phi}},$$

где C_{β} и C_{β}^{cm} – массовая доля урана в анализируемой пробе и стандартном образце, %;

J_{β}^{np} и J_{β}^{cm} – частота импульсов от β -излучения анализируемой пробы и стандартного образца, *имп/мин*;

J_{ϕ} – частота импульсов от фонового излучения, *имп/мин*.

Анализируемую и стандартную пробы, близкие по вещественному составу, измеряют в одинаковых геометрических условиях. Масса анализируемой пробы должна быть равна массе стандартного образца или отличаться от нее не более чем на 10 %.

2.2 Гамма-анализ твердых проб

Гамма-анализ применяют главным образом для определения массовой доли радия и коэффициентов эманирования. Кроме того, он является со-

ставной частью $\beta+\gamma$ -анализа и может использоваться для определения массовой доли урана (радия) в равновесных урановых рудах.

Определение массовой доли радия и коэффициентам эманирования. Методика определения массовой доли радия основана на серии измерений частоты импульсов от γ -излучения герметизированных проб по мере накопления в них радона.

Пробы перед герметизацией дезэмануруют продуванием, многократным пересыпанием или путем рассыпки тонким слоем. Затем пробы насыпают в сосуды, заполняя их полностью, и герметизируют. Толщина стенок сосудов должна быть достаточной для поглощения β -излучения.

Стандартные образцы, применяемые для анализа, должны быть загерметизированы по крайней мере за 30 суток до начала измерений. Масса анализируемой пробы не должна отличаться от массы стандартного образца более чем на 10 %.

Через 3 часа после герметизации, в течение которых устанавливается радиоактивное равновесие между радоном и продуктами его распада, выполняют первое измерение пробы и рассчитывают массовую долю в ней связанного радона C_{γ}^1 по формуле

$$C_{\gamma}^1 = C_{\gamma}^{cm} \cdot \frac{(J_{\gamma}^{np} - J_{\phi}) \cdot M_{\text{эт}}}{(J_{\gamma}^{cm} - J_{\phi}) \cdot M_{np}},$$

где C_{γ}^1 и C_{γ}^{cm} – массовая доля радона в анализируемой пробе и в стандартном образце, % равновесного U;

J_{γ}^{np} и J_{γ}^{cm} – частота импульсов от γ -излучения анализируемой пробы и стандартного образца, *имп/мин*;

J_{ϕ} – частота импульсов от фонового излучения, *имп/мин*;

M_{np} и $M_{\text{эт}}$ – массы анализируемой пробы и стандартного образца, г.

Спустя 3–5 суток (в зависимости от массовой доли радия в пробе) измерение пробы повторяют и по формуле

$$C_{\gamma}^2 = C_{\gamma}^{cm} \cdot \frac{(J_{\gamma}^{np} - J_{\phi}) \cdot M_{\text{эт}}}{(J_{\gamma}^{cm} - J_{\phi}) \cdot M_{np}}$$

рассчитывают массовую долю в ней связанного и свободного радона, накопившегося после первого замера C_{γ}^2 , а еще примерно через сутки или несколько позже проводят третье (а иногда еще и четвертое) измерение и делают аналогичный расчет. Из результатов двух измерений рассчитывают массовую долю свободного радона в пробе по формуле

$$C_{Rn} = \frac{(C_{\gamma}^i - C_{\gamma}^1)}{[1 - \exp(-\lambda t)]}$$

где C_{γ}^i – массовая доля свободного и связанного радона в пробе в момент i -го измерения, % равновесного урана;

$1 - \exp(-\lambda t)$ – поправка на накопление радона;

t – интервал времени между i -м и первым измерениями;

λ – постоянная распада радона.

Массовую долю радия (в % равновесного урана) рассчитывают по формуле

$$C_{Ra} = (C_{\gamma}^1 - C_{Ra}).$$

Коэффициент эманирования пробы:

$$K_{эм} = \frac{C_{Rn}}{C_{Ra}}.$$

2.3 Лабораторный бета-гамма-анализ твердых проб

Применяют для определения массовой доли урана в неравновесных урановых рудах и массовой доли урана и тория в равновесных уран-ториевых рудах.

Урановую неравновесную руду можно рассматривать как смесь радионуклидов двух групп: урановой и радоновой, т. е. как двухкомпонентную руду. Так же можно рассматривать и равновесную уран-ториевую руду.

Раздельное определение массовой доли радиоактивных нуклидов в двухкомпонентных рудах основано на том, что доли каждой из компонент в β - и γ -излучениях, регистрируемых детектором, различны. Доли урановой и радоновой групп в излучении примерно одинаковы, а γ -излучение в основном принадлежит радоновой группе.

По результатам β - и γ -измерений неравновесной урановой руды можно составить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C_{\beta} &= a_1 C_U + b_1 C_{Rn} \\ C_{\gamma} &= a_2 C_U + b_2 C_{Rn} \end{aligned} \right\}$$

где C_{β} и C_{γ} – массовые доли радионуклидов в пробе, вычисленные по ранее приведенным формулам, % эквивалентного урана;

C_U – массовая доля урана в пробе, %;

C_{Rn} – массовая доля радона в пробе, % равновесного урана;

a_1 , и b_1 – доли β -излучения урановой и радоновой групп в общем β -излучении нуклидов уранового ряда;

a_2 , и b_2 – доли γ -излучения тех же групп в общем γ -излучении нуклидов уранового ряда.

Учитывая, что

$$a_1 + b_1 = 1 \text{ и } a_2 + b_2 = 1,$$

выражение для расчета массовой доли урана можно записать в виде

$$C_U = \frac{b_2}{b_2 - b_1} C_\beta - \frac{b_1}{b_2 - b_1} C_\gamma.$$

По результатам β - и γ -измерений уран-ториевой руды можно составить систему уравнений:

$$C_\beta = C_U + c_1 C_{Th},$$

$$C_\gamma = C_U + c_2 C_{Th},$$

где C_{Th} – массовая доля тория, %;

c_1 и c_2 урановые эквиваленты равновесного тория по β - и γ -излучению.

Решение этой системы относительно массовой доли урана и тория имеет вид:

$$C_U = \frac{c_2}{c_2 - c_1} C_\beta - \frac{c_1}{c_2 - c_1} C_\gamma,$$

$$C_U = \frac{1}{c_2 - c_1} (C_\gamma - C_\beta).$$

2.4 Спектрометрический гамма-анализ

Этот анализ применяют в основном для одновременного определения нескольких радионуклидов и реже для определения какого-либо одного нуклида.

Анализ основан на измерении γ -излучения проб в нескольких энергетических интервалах, в каждом из которых преобладает излучение одного из определяемых нуклидов. Оптимальные энергетические интервалы измерений выбирают по дифференциальным спектрам γ -излучения урановой и ториевой руд. Значения энергии γ -излучения E , для отдельных каналов необходимо выбрать равными энергии одной из наиболее интенсивных линий каждого из компонентов, например, E_1 должен соответствовать энергии интенсивной линии урана, E_2 – радия, E_3 – тория и E_4 – калия. Наиболее интенсивные линии для изотопов семейства тория 0,24; 0,34; 0,58; 0,9 и 2,62 МэВ; для продуктов распада радия – 0,35; 0,6; 1,1 и 1,76 МэВ. Излучение калия имеет энергию 1,46 МэВ, а наиболее интенсивная линия слабого излучения урана имеет энергию 0,093 МэВ.

Таким образом, $E_1 = 0,093$ МэВ, $E_4 = 1,4$ МэВ, а значения E_2 и E_3 могут быть выбраны из перечисленных интенсивных линий радия и тория.

Измерения при анализе проводят в тонком слое, чтобы можно было пренебречь поглощением γ -излучения данной линии в пробе. В этом случае площадь фотопика аналитической линии пропорциональна массовой доле излучающего нуклида.

Массовую долю нуклида в пробе C , %, вычисляют по формуле

$$C = C_{cn} \frac{S_{np} \cdot M_{cm}}{S_{cm} \cdot M_{np}},$$

где S_{np} и S_{cm} – площадь фотопика от анализируемой и стандартной проб соответственно;

M_{np} и M_{cm} – масса анализируемой и стандартной проб.

Для анализа на уран, радий, торий и калий необходимо выполнить четыре измерения пробы при таких условиях, чтобы при каждом измерении максимально выделялось излучение одного из определяемых элементов.

С помощью спектрометра проводят измерения скорости счета в четырех энергетических окнах. Кроме того, проводят еще измерение скорости счета от фона.

По результатам измерений составляют систему уравнений, позволяющую определить четыре элемента:

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= a_1 C_U + b_1 C_{Rn} + c_1 C_{Th} + d_1 C_k \\ J_2 &= a_2 C_U + b_2 C_{Rn} + c_2 C_{Th} + d_2 C_k \\ J_3 &= a_3 C_U + b_3 C_{Rn} + c_3 C_{Th} + d_3 C_k \\ J_4 &= a_4 C_U + b_4 C_{Rn} + c_4 C_{Th} + d_4 C_k \end{aligned} \right\}$$

где J_1, J_2, J_3, J_4 – измеряемая интенсивность γ -излучения пробы в i -канале;

a_i и b_i – доли излучения, приходящиеся на группы урана и радия от общего излучения элементов уранового ряда;

c_i и d_i – урановые эквиваленты тория и калия;

C_U, C_{Th} и C_K – массовые доли урана, тория и калия в пробе, %;

C_{Ra} – массовая доля радона в пробе, % равновесного урана.

Для урановых стандартных образцов с различными коэффициентами радиоактивного равновесия и эманирования числовые значения коэффициентов a, b, c и d разные, поэтому их определяют экспериментально для каждого типа образца.

Решение системы относительно искомых величин приводит к формулам вида

$$\left. \begin{aligned} C_U &= m_1 J_1 + n_1 J_2 + k_1 J_3 + l_1 J_4 \\ C_{Rn} &= m_2 J_1 + n_2 J_2 + k_2 J_3 + l_2 J_4 \\ C_{Th} &= m_3 J_1 + n_3 J_2 + k_3 J_3 + l_3 J_4 \\ C_K &= m_4 J_1 + n_4 J_2 + k_4 J_3 + l_4 J_4 \end{aligned} \right\}$$

где коэффициенты m_i, n_i, k_i и l_i , зависят от спектральной чувствительности применяемого детектора.

2.5 Анализ по эманациям

Определение массовой доли радия. Массовую долю радия в пробе определяют по равновесному с ним радону. Для анализа пробу химическим способом переводят в раствор. Полученный раствор наливают в барботер, продувают воздухом для удаления из него радона и герметизируют. Если барботер держать загерметизированным в течение 30 суток, то в нем накопится равновесное с радием количество радона. Практически не дожидаясь полного накопления, через 3–5 суток после герметизации раствора накопившийся радон из барботера вакуумным способом переводят в эманационную камеру и спустя 2–3 ч измеряют его α -излучение. Зная время накопления радона, массовую долю равновесного с ним радия (z Ra/ z пробы) рассчитывают по формуле

$$C_{Ra} = \frac{KN_\alpha V}{Mv[1 - \exp(-\lambda t)]}$$

где N_α – частота импульсов в альфа-сцинтилляционной установке или ионизационный ток в ионизационной камере от α -излучения;

K – константа прибора, на котором производят измерения;

$1 - \exp(-\lambda t)$ – поправка на накопление радона;

t – интервал времени, в течение которого накапливался радон;

M – масса пробы, переведенной в раствор, г;

v – объем аликвоты, см³;

V – общий объем раствора, см³.

Каждую пробу анализируют дважды, и если расхождение между результатами не превышает 10 %, то окончательным результатом считают среднее из двух значений. В случае больших расхождений пробу анализируют третий раз.

Определение концентрации радона в природных водах. Измерения при эманационном методе определения концентрации радона в природных водах выполняют так же, как при эманационном методе определения радия в растворах. Но при расчете концентрации радона константу прибора выражают в беккерелях на импульс в минуту.

Необходимый для анализа объем воды зависит от чувствительности измерительной установки и от концентрации радона. При измерениях на сцинтилляционной установке достаточно 50 мл воды при концентрации в ней радона 40 Бк/л. В таких случаях пробу можно отбирать непосредственно в барботер и переводить из него радон вакуумным способом. При меньшей концентрации радона объем пробы увеличивают до 1–2 л. Пробу отбирают в бутыл с резиновой пробкой, в которую вставлены две стеклянные трубки: длинная и короткая. Воды в бутылки должно быть столько, чтобы нижний конец длинной трубки был в воде, а короткая трубка была над водой.

Радон из бутылки с пробой переводят в измерительную камеру циркуляционным способом (рисунок 5). С помощью резиновой груши создают циркуляцию воздуха, которая через 15–20 мин приводит к равномерному распределению радона по всей системе. Воздух в воду подают через длинную трубку, а откачивают через короткую.

В измерительную камеру попадает только часть радона, но, зная объемы составных частей системы, можно рассчитать общее количество радона в пробе.

Концентрацию радона (Бк/л) рассчитывают по формуле

$$C_{Tn} = KN_\alpha V_1/V_2 \cdot [1 - \exp(-\lambda t)] \cdot (V_1 + V_2 - V_3 + a_1 V_3 + V_4),$$

где V_1 – объем измерительной камеры, л;

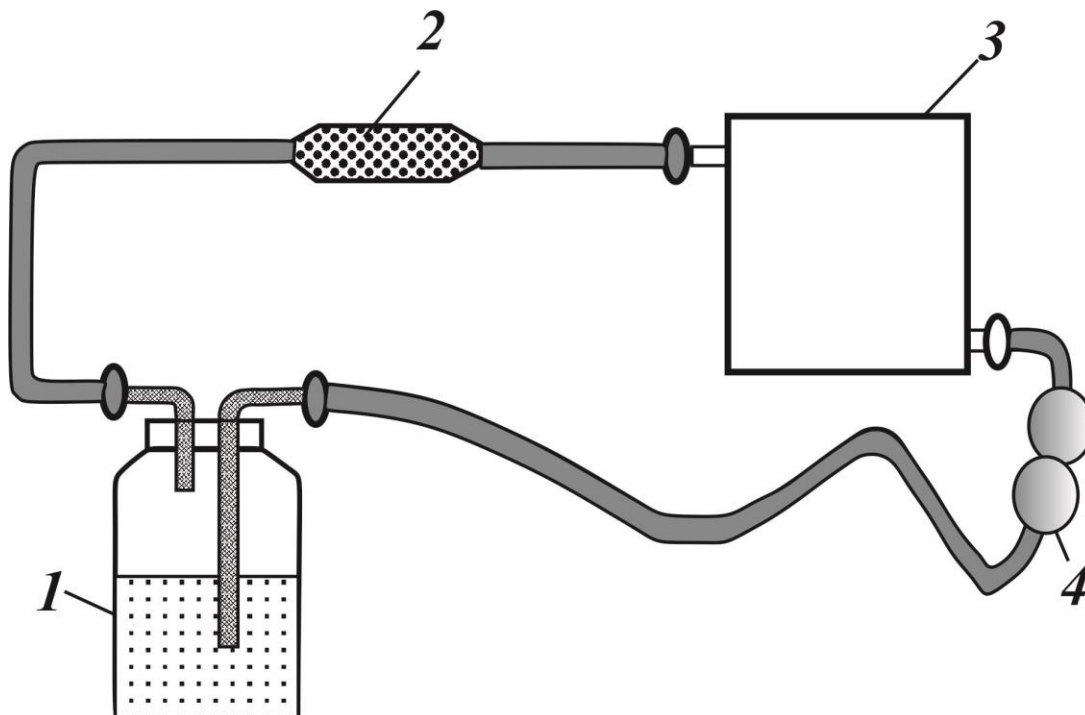
V_2 – объем сосуда с анализируемой водой, л;

V_3 – объем анализируемой воды, л;

V_4 – объем соединительных трубок и груши, л;

a_1 – коэффициент растворимости радона в воде.

Если пробу анализируют не сразу после отбора, то в результате измерений следует вводить поправку на распад радона за время от момента отбора пробы до измерений.



1 – бутылка с пробой анализируемой воды; 2 – осушитель;

3 – измерительная камера; 4 – резиновая груша

Рисунок 5 – Схема введения радона в измерительную камеру циркуляционным способом

Вопросы для самоконтроля

1 Для чего применяют лабораторные радиометрические методы анализа?

2 Какой метод измерений в основном используется при геологических исследованиях?

3 Какие лабораторные методы выделяют в ядерной геофизике в зависимости от способа регистрации излучения?

4 В чем состоит особенность лабораторного бета-анализа твердых проб?

5 Для чего применяют спектрометрический гамма-анализ?

3 ПОЛЕВЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ИХ ЕСТЕСТВЕННОГО ЗАЛЕГАНИЯ

3.1 Классификация методов.

3.2 Основные поисковые признаки радиометрических методов.

3.3 Пешеходная гамма-съемка.

3.1 Классификация методов

Радиометрические методы поисков и разведки полезных ископаемых и исследования горных пород основаны на измерении радиоактивных излучений.

Радиометрические методы исследования горных пород в условиях их естественного залегания можно разделить на две группы:

а) *полевые радиометрические методы* (гамма-съемка), применяемые для приближенной оценки радиоактивности горных пород и изучения ее изменений по маршруту, профилю или по заданной сетке;

б) *методы радиометрического опробования*, позволяющие более точно определять радиоактивность горных пород в условиях их естественного залегания (в скважинах, шурфах, обнажениях и т. п.)

Гамма-съемку применяют для поисков месторождений радиоактивных руд, для геологического и геохимического картирования, выделения контактов пород и маркирующих горизонтов, а также для поисков полезных ископаемых, парагенетически связанных с радионуклидами (редкие земли, фосфор и др.).

По условиям проведения различают *пешеходную, авто-, аэро- и морскую γ -съемку*, а по условиям регистрации γ -излучения – *съемку по общему γ -излучению и спектрометрическую*.

Гамма-съемки по общему γ -излучению позволяют получить только качественную характеристику поля γ -излучения, отражающую распределение суммы природных радионуклидов.

Спектрометрические γ -съемки дают представление о распределении в породах урана, тория и калия. Однако такие съемки требуют применения более сложной аппаратуры и методики измерений, их производительность значительно ниже производительности съемок по общему γ -излучению.

Результаты измерений при γ -съемках по общему γ -излучению выражают в величинах мощности экспозиционной дозы по радиевому источнику.

Результаты спектрометрических γ -съемок выражают в единицах равновесного урана, тория и калия.

3.2 Основные поисковые признаки радиометрических методов

В основе радиометрических методов лежит обнаружение различных поисковых признаков в виде коренных выходов руд и ореолов рассеяния вокруг рудного тела. Поиски урановых месторождений ведут по ореолам и потокам рассеяния, которые образуются в четвертичных рыхлых отложениях. Различают *механические, солевые и эманационные ореолы*.

Механический ореол – это область, примыкающая к рудному телу, в которой распространен обломочный рудный материал, образовавшийся в результате выветривания горных пород.

Солевые ореолы рассеяния образуются в результате выноса урана грунтовыми водами и перееотложения его в наносах и в почвенном слое вблизи коренного месторождения. Солевой ореол рассеяния по существу зарождается в механическом ореоле, но распространяется дальше его и имеет большие размеры.

На пути поверхностных и подземных стоков образуются *потоки рассеяния*, которые представляют собой область повышенных массовых долей урана и радия, примыкающих к ореолу рассеяния.

В определенных условиях растворенный уран легко сорбируется органикой почв, лимонитами и глиной и образует вторичные *ложные солевые ореолы и потоки рассеяния*.

Различают *механические и солевые потоки рассеяния*.

Механические потоки рассеяния чаще всего образуются при резко расчлененном рельефе, когда водные потоки механически перемещают рыхлые отложения с содержащимся в них обломочным рудным материалом к пониженным частям рельефа. Дальность выноса обломочного материала может достигать нескольких сот метров и даже 1–2 км. Распределение рудного материала в потоке очень неравномерное.

Солевые потоки рассеяния формируются на пути движения грунтовых вод. Просачивающиеся сверху вниз грунтовые воды легко растворяют большинство первичных урановых минералов, которые затем переотлагаются в форме более устойчивых соединений (солей). Эти потоки характеризуются равномерным распределением и невысокими массовыми долями урана.

Эманионные ореолы образуются в результате диффузии и конвективного переноса радона, выделившегося из урановых руд в результате эманирования. Они могут также возникать в местах переотложения радия.

3.3 Пешеходная гамма-съемка

Она применяется в основном при поисках месторождений радиоактивных элементов и сопутствующих им полезных ископаемых.

В зависимости от задач, главным образом от густоты точек наблюдения, выделяют *рекогносцировочную, маршрутную* и *площадную* съемки.

При пешеходной съемке полевым радиометром измеряют интенсивность γ (или β, γ)-излучения пород и руд в точках, расположенных по намеченному заранее маршруту или профилю. На участках развития ореолов открытого типа измерения проводятся на поверхности земли, а при наличии неактивных наносов от 0,3 до 1,5 м в закопушках и шпурах. При большей мощности рыхлых наносов (до 20 м) применяется специальное устройство для задавливания радиометров в рыхлых отложениях или бурение мелких скважин.

Глубинность гамма-метода относительно невелика. Обычно за глубинность метода принимается мощность наносов, при которой поток излучения от пласта в три раза превышает колебания потока излучения для нормального поля.

Наиболее благоприятны для применения поверхностной пешеходной съемки обнаженные участки и районы с открытыми механическими или солевыми ореолами. Обычно – это районы с расчлененным рельефом и широко развитой современной гидросетью.

Неблагоприятны для поверхностной съемки районы с большой мощностью современных отложений и районы, хотя и с малой мощностью покрова, но с резко выраженным промывным режимом, приводящим к вымыванию радиоактивных элементов из зоны исследования гамма-метода.

Методика исследований. По данным рекогносцировки, предшествующей проведению поисков, уточняются природные условия ведения работ, мощность и характер рыхлых отложений, условия формирования в них ореолов рассеяния, нормальные значения радиоактивности отдельных типов горных пород. Выделяются наиболее перспективные по геологическим данным участки, намечаются маршруты, обычно в крест простирания геологических структур, зон тектонических нарушений, контролирующих оруденения.

Пешеходную гамма-съемку по маршрутам проводят путем непрерывного прослушивания γ -излучения пород с помощью телефона и отсчета показаний по стрелочному прибору радиометра в отдельных точках. Оператор медленно передвигается (скорость 1–2 км/ч) по маршруту, держа выносной датчик на высоте 5–10 см от поверхности земли. На вымеченных для наблюдения точках датчик прикладывается к обследуемой поверхности. Отсчет записывается в мкР/ч или иногда в делениях шкалы. Кроме измерений по маршруту оператор отклоняется от него в полосе шириной до 100 м для обследования имеющихся там горных выработок, обнажений пород, крупных валунов, осыпей и т. п.

При обнаружении на маршруте точки с повышенным γ -излучением проводится более тщательное обследование окружающей зоны. После нахождения точки с максимальным в этой зоне γ -излучением проводится измерение γ -излучения в закопушках с целью обнаружения высокоактивного образца. Аномальные точки отмечаются на местности репером. Для определения размера аномалии проводят дополнительные профили, параллельные маршруту (основному профилю). На поисковом этапе параллельно с γ -излучением проводят геологические наблюдения, отбирают образцы пород, пробы воды, растений, донных осадков для последующего лабораторного изучения.

Разновидностью пешеходной гамма-съемки является шпуровая гамма-съемка. Она проводится на площадях, где рудные тела или их ореолы перекрыты рыхлыми неактивными отложениями мощностью 1–3 м и более и недоступны для общей гамма-съемки.

Измеряют γ -излучения в шпуре (мелкой скважине) через каждые 10–20 см с помощью радиометров с телескопическим зондом.

Обработка и интерпретация результатов. Этот этап работ включает:

а) перевод показаний, зарегистрированных в делениях шкалы, в мкР/ч (с помощью эталонировочного графика или переводной таблицы), и вычитание натурального (при измерениях на поверхности) или остаточного фона (при измерениях в шпурах);

б) нанесение на радиометрическую карту (составленную на геологической основе) результатов измерений, включая радиоактивность обнажений, горных выработок и водопунктов;

в) графическое изображение результатов съемки в виде карты, профилей интенсивности излучения, карты изолиний интенсивности γ -излучения и т. п.;

г) геологическая интерпретация результатов: изучение нормального распределения радиоактивных элементов в различных комплексах пород; выявление участков повышенной активности среди однотипных пород

с целью проведения на этих участках детальных исследований; выявление локальных аномалий γ -поля и их перспективная оценка.

За аномалию принимают превышение активности над средним фоном пород более чем на утроенную величину среднеквадратического колебания нормального фона. Аномалии γ -поля делят на три группы:

- а) рудные аномалии, связанные с рудными скоплениями радиоактивных элементов или ореолами их рассеяния;
- б) аномалии, связанные с потоками рассеяния;
- в) безрудные аномалии, связанные с изменением нормальной радиоактивности горных пород, степени их обнажения и т. п.

Рудные аномалии, в свою очередь, подразделяются на *урановые, ураноториевые и ториевые*. По интенсивности γ -излучения выделяют *малоинтенсивные* (до 3–4 мкР/ч), *средней интенсивности* (4–8 мкР/ч) и *интенсивные* (> 8 мкР/ч) аномалии. Наконец, по протяженности аномалии разделяют на *локальные* (до 0,35 км) и *нелокальные*.

Оценка аномалий – завершающий этап наземных поисков.

При оценке аномалий учитываются следующие признаки.

Форма и протяженность аномалий. Большинству выходов урановых тел и ореолов рассеяния соответствуют относительно небольшие размеры аномалий: от десятков до 500–800 м. Поэтому небольшая протяженность аномалий является критерием оценки ее перспективности. Однако локальные аномалии наблюдаются также над пегматитами и обнажениями пород с повышенными кларками радиоактивных элементов, например тория.

Интенсивность аномалий. Достаточно высокая интенсивность γ -излучения, соответствующая содержанию урана в приповерхностном слое < 0,001 % также является признаком перспективности аномалии. Однако и для рудных аномалий часто интенсивность бывает невысока.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Какие виды гамма-съемок выделяют по условиям проведения работ?
- 2 В чем состоит основное отличие гамма-съемки по общему гамма-излучению от спектрометрической гамма-съемки?
- 3 Чем отличается гамма-съемка по общему гамма-излучению от радиометрического опробования?
- 4 Перечислите основные поисковые признаки радиометрических методов.
- 5 В чем заключается сущность пешеходной гамма-съемки?
- 6 Почему глубинность гамма-метода относительно невелика?
- 7 Укажите особенности методики проведения пешеходной гамма-съемки.

4 СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ ГАММА-СЪЕМКА

4.1 Физические и геохимические основы гамма-спектрометрии.

4.2 Принцип раздельного определения U(Ra), Th, и K.

4.3 Модификации полевой гамма-спектрометрии.

4.1 Физические и геохимические основы гамма-спектрометрии

Спектрометрическая гамма-съемка позволяет определять концентрации природных радионуклидов: урана (*по радию*), тория и калия в различных средах – в горных породах, воде и воздухе.

Этот метод основан на различиях спектрального состава γ -излучения уранорадиевого и ториевого рядов и калия.

Приборы, с помощью которых определяют концентрации природных радионуклидов, называются *спектрометрами* или *концентрометрами*.

Интенсивность гамма-излучения в любой точке пространства может быть представлена уравнением

$$I_{\gamma} = aC_U + bC_{Th} + cC_K,$$

где C_U и C_{Th} – концентрации урана и тория, 10^{-4} %;

C_K – концентрация калия, %;

a , b , c – коэффициенты, учитывающие вклад соответствующих природных радионуклидов в регистрируемую интенсивность γ -излучения.

Такие уравнения могут быть получены путем измерений спектров гамма-излучения специальных образцов (моделей) урана, тория и калия с известными концентрациями этих природных радионуклидов.

На рисунке 6 приведены дифференциальные, т. е. последовательно измеренные через определенные интервалы энергий, спектры гамма-излучения уранорадиевой, ториевой и калиевой моделей с известными концентрациями этих природных радионуклидов.

В приведенных спектрах отдельными отчетливыми максимумами выделяются спектральные линии 1,76 МэВ – на урановом образце, 1,46 МэВ – на калиевом и 2,62 МэВ – на ториевом образце. Оптимальными границами рабочих окон при измерениях спектрометрами со сцинтилляционными детекторами являются следующие интервалы энергий: 1,35–1,55 МэВ, 1,65–1,85 МэВ, 2,5–2,8 МэВ.

Концентрации природных радионуклидов в коренном залегании пород определяют, сравнивая интенсивности гамма-излучения образцов концентраций (моделей) и исследуемых трех определенных интервалах спектра (рабочих окнах или рабочих каналах).

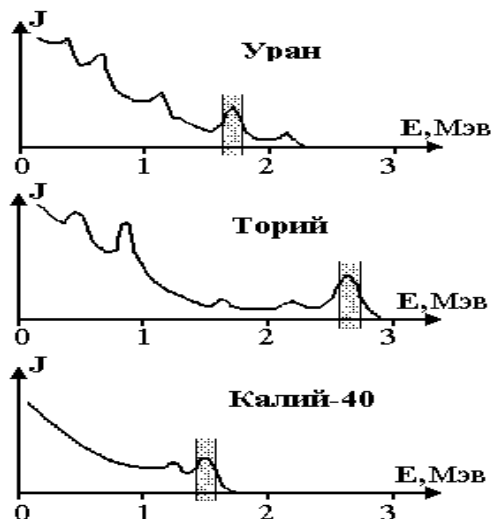


Рисунок 6 – Аппаратурные спектры гамма-излучения урана, тория и калия, и соответствующие им энергетические окна

Таким образом, суть спектрометрического гамма-метода заключается в измерении гамма-спектрометрами γ -излучения горных пород и руд в трех энергетических интервалах, выбранных таким образом, чтобы в каждом из них максимально преобладало излучение одного из определяемых нуклидов. По этим данным вычисляют массовые доли (концентрации) урана (по радию), тория и калия и выявляют гамма-аномалии, связанные с определяемыми радионуклидами.

4.2 Принцип раздельного определения U(Ra), Th, и K

Определение концентраций U, Th, и K в геологических телах с равномерно распределенными излучателями сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{aligned} n_1 - n_{10.ф.} &= \dot{n}_1 = a_1 C_U + b_1 C_{Th} + c_1 C_K ; \\ n_2 - n_{20.ф.} &= \dot{n}_2 = a_2 C_U + b_2 C_{Th} + c_2 C_K ; \\ n_3 - n_{30.ф.} &= \dot{n}_3 = a_3 C_U + b_3 C_{Th} + c_3 C_K , \end{aligned}$$

где n_i и $n_{o.ф.}$ – средняя частота импульсов в 1-м, 2-м и 3-м энергетических окнах (i -номер окна), соответственно при измерениях излучения горных пород и остаточного фона, $имп/с$;

a_i , b_i , и c_i – пересчетные коэффициенты, равные средним частотам импульсов в этих же окнах, измеренным на насыщенных по гамма-излучению рудных моделях и отнесенным к единице концентрации радиоактивного элемента, $имп/с$ на 10^{-4} U и Th и на 1 % K;

C_U , C_{Th} и C_K – соответственно, концентрации U, Th (10^{-4} %) и K (%).

Решение системы дает формулы для расчета концентраций радиоактивных элементов:

$$C_U = \frac{b_2c_3 - b_3c_2}{D} \dot{n}_1 + \frac{b_3c_1 - b_1c_3}{D} \dot{n}_2 + \frac{b_1c_2 - b_2c_1}{D} \dot{n}_3 = A_U \dot{n}_1 + B_U \dot{n}_2 + F_U \dot{n}_3 ;$$

$$C_{Th} = \frac{a_3c_2 - a_2c_3}{D} \dot{n}_1 + \frac{a_1c_3 - a_3c_1}{D} \dot{n}_2 + \frac{a_2c_1 - a_1c_2}{D} \dot{n}_3 = A_{Th} \dot{n}_1 + B_{Th} \dot{n}_2 + F_{Th} \dot{n}_3 ;$$

$$C_K = \frac{a_2b_3 - a_3b_2}{D} \dot{n}_1 + \frac{a_3b_1 - a_1b_3}{D} \dot{n}_2 + \frac{a_1b_2 - a_2b_1}{D} \dot{n}_3 = A_K \dot{n}_1 + B_K \dot{n}_2 + F_K \dot{n}_3 ,$$

где A , B и F – градуировочные коэффициенты (коэффициенты обратной матрицы коэффициентов a_i , b_i , c_i);

D – определитель системы:

$$D = a_1b_2c_3 + b_1c_2a_3 + c_1a_2b_3 - a_3b_2c_1 - b_3c_2a_1 - c_3a_2b_1 .$$

Подставив в уравнение численные значения пересчетных коэффициентов, получают рабочие уравнения для расчетов C_U , C_{Th} и C_K .

Для приборов с хорошим энергетическим разрешением излучение K^{40} не регистрируется во втором и третьем рабочих энергетических окнах. В этом случае $c_2 = c_3 = 0$ и поэтому уравнение для расчета содержаний радиоактивных элементов упрощается.

Пересчетные коэффициенты определяют на насыщенных по γ -излучению моделях однокомпонентных руд равновесного урана, тория и калия. На каждой модели измеряют среднюю частоту импульсов в трех рабочих энергетических окнах гамма-спектрометра и рассчитывают коэффициенты:

$$a_i = \frac{n_{i,U} - n_{io.ф.}}{C_{U,m}} , b_i = \frac{n_{i,Th} - n_{io.ф.}}{C_{Th,m}} , c_i = \frac{n_{i,K} - n_{io.ф.}}{C_{K,m}} ,$$

где $C_{(U, Th, K), m}$ – концентрация в насыщенных моделях U, Th (10^{-4} %) и K (%) соответственно.

Полевые наблюдения со спектрометром заключаются в измерении на точке опробования средних частот импульсов в трех рабочих окнах и в последующем расчете по рабочим формулам концентраций U, Th, и K в породах на месте залегания.

4.3 Модификации полевой гамма-спектрометрии

В настоящее время для решения этих задач применяется несколько модификаций полевой гамма-спектрометрии: а) *пешеходная*, б) *интервальная*, в) *автомобильная*, г) *аэрогамма-спектрометрия*, д) *спектрометрический гамма-картаж (СГК)*.

Пешеходная гамма-спектрометрия. Пешеходную гамма-спектрометрию применяют практически на всех этапах геологоразведочных работ. Но в основном этим методом изучают природу выявленных γ -съемкой или аэрогамма-спектрометрией локальных аномальных участков и разделяют их на три основных типа: урановые (U), урано-ториевые (U+Th) и аномалии неурановой природы. Проведение этого вида съемки наиболее целесообразно на участках с мощностью наносов не более 1–1,5 м.

При проведении пешеходной гамма-спектрометрии используют в основном гамма-концентратор РКП-305 и одноканальный гамма-спектрометр СП-4.

По условиям и особенностям техники измерений различают:

- измерения на плоской поверхности пород с наземным блоком детектирования при отсутствии мешающего бокового излучения (2π -геометрия);
- измерения в шпурах диаметром не менее 45 мм и глубиной не менее 0,5 м (4π -геометрия) со шпуровым блоком детектирования;
- измерения в сложных геометрических условиях (горные выработки, локальные повышения и понижения рельефа и т. п.).

Шаг (расстояние между точками измерений) зависит от размеров аномальных объектов и масштаба съемки и обычно составляет 5–10 м, расстояние между профилями зависит от масштаба съемки. При этом обязателен уверенный выход в нормальное гамма-поле, по которому оценивают фоновые концентрации.

В поверхностных горных выработках измерения производят обычно с интервалом 1–2 м, в аномальных зонах – через 0,5 м.

Все полевые измерения заносят в полевой журнал, туда же записывают сведения об условиях измерений, особенностях методики и т. п.

Первичная обработка материалов съемки включает вычисление концентраций природных радионуклидов, введение поправок на геометрические условия измерений и построение графиков распределения концентраций природных радионуклидов по профилям.

Основным итоговым документом пешеходной гамма-спектрометрии являются карты (планы) графиков концентраций природных радионуклидов (рисунок 7).

Интервальная гамма-спектрометрия. Применяют при изучении перспективных площадей, выявленных аэрогамма-спектрометрией или гидрохимическим опробованием поверхностных водотоков. Её цель – локализация участков для постановки в их пределах детальных исследований.

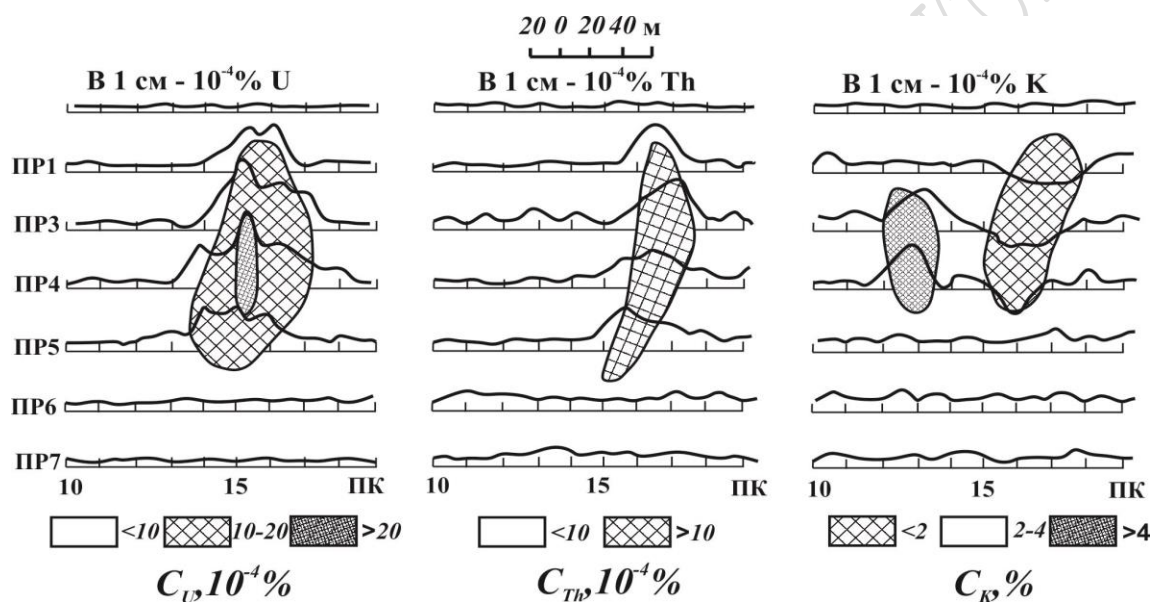


Рисунок 7 – Пример оформления результатов пешеходной гамма-спектрометрии

Основное отличие интервальной гамма-спектрометрии от традиционных пешеходных съемок состоит в совмещении процесса измерения и движения оператора по профилю, что позволяет увеличить в несколько раз производительность съемки.

Съемка в движении может проводиться по профилям и в маршрутном варианте. Оптимальная скорость движения радиометриста 25 (60) м/мин, оптимальные масштабы съемки – 1:25000–1:10000.

Автомобильная гамма-спектрометрия. Применяется для выявления и оконтуривания радиоактивных аномалий в пределах перспективных участков и предварительной разбраковки аномалий. Основное преимущество этого вида съемки – оперативность получения результатов. Автогамма-спектрометрию проводят на открытых и полукрытых в равнинных, слабозалесенных и не заболоченных территориях с углами наклона местности не более 10 %.

Для проведения съемки используют автогамма-спектрометры типа АГС-ЗМ, РСА-007, установленные на автомашине. Гамма-спектрометры обычно имеют четыре рабочих канала, которые позволяют регистрировать гамма-кванты в режиме общего (интегрального) в счета и в трех дифференциальных каналах: урановом, ториевом и калиевом.

Существуют два вида автогамма-спектрометрии:

а) *маршрутная съемка*, которую применяют при рекогносцировочных исследованиях средних и мелких масштабов (1:50 000 и мельче);

б) *площадная съёмка*, проводят при крупномасштабных исследованиях по заранее подготовленной сети профилей. Расстояния между профилями в зависимости от характера рельефа местности и масштаба съемки изменяются от 0,5 до 3–4 км. Средняя скорость движения автомобиля по профилю 10–15 км/ч. Масштабы площадной автогамма-спектрометрии 1:10 000–1:5 000.

Аэрогамма-спектрометрия – это скоростной метод поисков радиоактивных руд, а также других полезных ископаемых, имеющих генетическую или корреляционную связь с природными радионуклидами. Кроме того, данные аэрогамма-спектрометрии широко используют при геологическом картировании территории поисков.

Съемки проводят с самолетов и вертолетов, на которые устанавливают специальные аэроспектрометры.

Различают следующие виды съемок:

- рекогносцировочные (масштабы 1:500 000–1:1 000),
- собственно съемочные (1:25 000–1:200 000),
- детальные (1:10 000).

Высота съемки зависит от характера местности и может изменяться от 25 до 100–130 м. В равнинных и среднегорных районах аэропоиски проводят по прямолинейным маршрутам, в горных районах – по криволинейным маршрутам, путем облета склонов по горизонталям.

Вопросы для самоконтроля

1 Для определения концентрации каких природных радионуклидов применяется спектрометрическая гамма-съемка?

2 Как называются приборы, с помощью которых определяют концентрации природных радионуклидов?

3 В чем заключается суть спектрометрического гамма-метода?

4 Коротко сформулируйте принцип отдельного определения U , Th , и K .

5 Перечислите основные факторы, влияющие на результаты спектрометрической гамма-съемки.

6 Какие модификации полевой гамма-спектрометрии вы знаете?

5 ЭМАНАЦИОННАЯ СЪЕМКА

- 5.1 Сущность эманационной съемки.
- 5.2 Способы регистрации альфа-излучения радона при съемке.
- 5.3 Методика эманационной съемки с отбором проб воздуха.
- 5.4 Методика проведения трековой съемки.
- 5.5 Применение эманационной съемки.

5.1 Сущность эманационной съемки

Эманационная съемка – это метод поисков месторождений урана и тория, основанный на изучении распределения эманации в горных породах и почвах путем анализа подпочвенного воздуха.

В результате эманационной съемки устанавливают значение *нормального эманационного поля* – среднюю концентрацию эманации в подпочвенном воздухе, обусловленную кларковыми количествами радионуклидов на исследуемой площади, и выделяют *эманационные аномалии*.

Эманационными аномалиями считают концентрации эманации в подпочвенном воздухе, превышающие нормальное эманационное поле минимум в 3 раза.

Радоновые и радон-тороновые аномалии могут быть вызваны:

- а) выходами под наносы урановых и уран-ториевых руд;
- б) механическими и солевыми ореолами рассеяния, образующимися над рудными телами;
- в) радон-радиевыми водами;
- г) скоплениями в наносах радия, переотложенного в процессе миграции.

Кроме того, могут быть так называемые *аномалии эманирования* и *аномалии экранирования*.

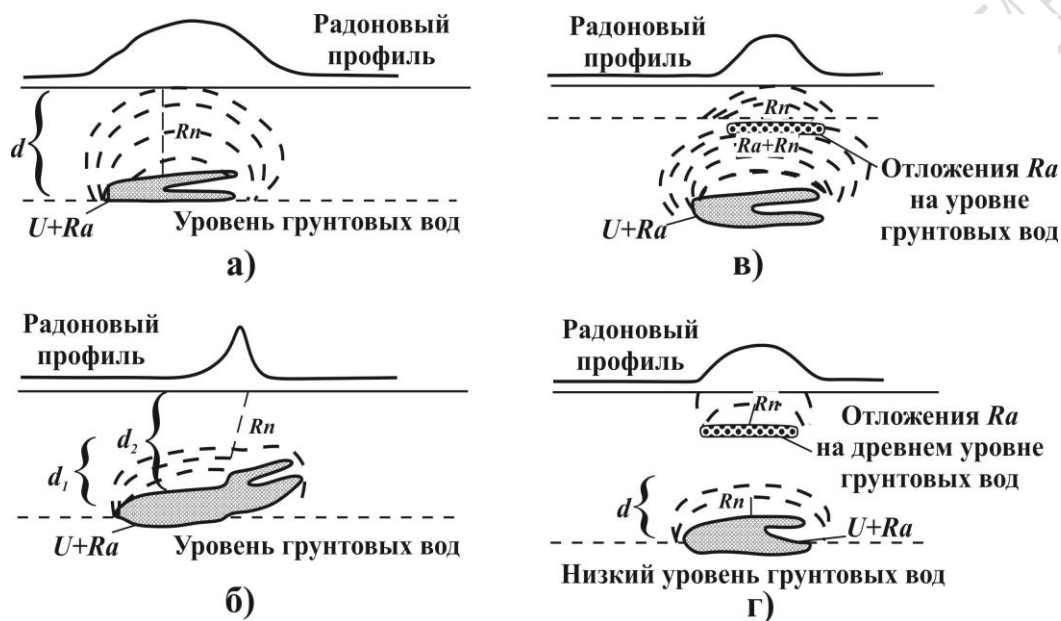
Аномалии эманирования обусловлены локальным увеличением выделения радона по зонам разлома, трещинам, на участках сильно выветрелых пород.

Аномалии экранирования связаны с наличием в рыхлых отложениях локальных газонепроницаемых образований (глинистые отложения, увлажненные почвы), расположенных над горизонтом отбора проб воздуха и препятствующих диффузии эманации. Зачастую такие аномалии связаны с уплотненными участками поверхности рыхлых отложений (дороги, тропы). Характерно формирование аномалий после дождя, когда вода, попавшая в поры пород, препятствует нормальному газообмену.

Главной причиной образования эманационных ореолов является эманирование из рудного тела свободного радона (торона).

Миграция радона возможна путем *диффузии и конвективного переноса* с потоками воздуха и воды. Только одной диффузией нельзя объяснить перенос радона на большие расстояния от рудных тел. Наличие эманационных ореолов на расстояниях десятков и даже сотен метров от рудных тел указывает на то, что в благоприятных условиях доминирующим процессом в миграции радона является конвективный перенос.

Следует иметь в виду, что рудные тела часто локализуются именно в зонах нарушений горных пород, что создает благоприятные условия для распространения радона на значительные расстояния (рисунок 8).



- а) диффузионный ореол радона непосредственно от рудного тела;
- б) аномалия над трещинной зоной, по которой переносится радон;
- в) ореол радона выше уровня грунтовых вод от радия, переотложенного на верхнем уровне грунтовых вод; горизонтального движения воды нет;
- г) ореол радона от радия, переотложенного на ранее существовавшем уровне грунтовых вод

Рисунок 8 – Типы радоновых аномалий

5.2 Способы регистрации альфа-излучения радона при съемке

Радон определяют по α -излучению, испускаемому самим радоном и продуктами его распада.

При эманационной съемке применяют три способа регистрации α -излучения радона:

- 1) *ионизационный*, основанный на ионизации α -излучением воздуха в измерительной камере;

2) *сцинтилляционный*, основанный на возбуждении сцинтилляций в сернистом цинке при облучении его α -частицами;

3) *трековый*, основанный на образовании радиационных дефектов (треков) в специальной целлюлозной пленке при облучении ее α -частицами с энергией, превышающей 2 МэВ.

Первые два способа требуют отбора проб подпочвенного воздуха.

При эманационной съемке применяют *динамический* и *статический* способы отбора проб.

Динамический способ заключается в прокачивании воздуха с радоном из буровых скважин глубиной 0,2–3,0 м в течение 5–15 мин до получения устойчивых показаний прибора. Способ пригоден при съемке в проницаемых песчаниках. Недостатком способа является возможность разбавления подпочвенного воздуха атмосферным.

Статический способ заключается в отборе проб подпочвенного воздуха из шпуров глубиной 0,6–1,0 м в измерительную камеру.

Первые два способа измерения радона реализуются с помощью эманометров. Третий способ реализуется с помощью чувствительных фотопленок.

Измерения радона при эманационной съемке выполняют с помощью полевых эманометров. Эманометры градуируют с помощью стандартных жидких радиевых образцов, содержащих $n \cdot 10^{-8}$ – $n \cdot 10^{-10}$ г радия. Растворы, налитые в барботер, герметично закрывают на определенное время для накопления в них радона. Накопившийся радон вакуумным или циркуляционным способом переводят в измерительную камеру и спустя 3 ч измеряют частоту импульсов сцинтилляционным прибором или подсчитывают количество делений шкалы ионизационного прибора.

При вакуумном способе переведения радона в измерительную камеру его массу в единицах равновесного с ним радия можно рассчитать по формуле

$$C_{Ra} = C_{Rn}[1 - \exp(-\lambda t)].$$

При циркуляционном способе переведения радона его массу в единицах равновесного радия рассчитывают по формуле

$$C_{Ra} = \frac{C_{Rn}[1 - \exp(-\lambda t)] \cdot V_{\kappa}}{V_{\text{общ}}},$$

где C_{Ra} – масса радия в источнике, г;

λ – постоянная распада радона;

t – время накопления радона;

V_K – объем измерительной камеры, л;

$V_{\text{общ}}$ – объем всей циркуляционной системы, л.

Цену деления шкалы прибора ($Bк/дел \cdot л$ или $Bк \cdot мин/имп \cdot л$) рассчитывают по формуле

$$K = \frac{3 \cdot 10^{10} \cdot C_{Rn}}{N_{\alpha} \cdot V_K},$$

где N_{α} – частота импульсов, $имп/мин$, или ионизационный ток, $дел$, от α -излучения радона без фонового излучения;

V_K – объем измерительной камеры, л.

5.3 Методика эманационной съемки с отбором проб воздуха

Пробы воздуха отбирают через пробоотборники, которые залавливают в рыхлые отложения или устанавливают в специально пробуренных шпурах. В последнем случае следует тщательно уплотнить устье шпура коническим наконечником для исключения подсоса атмосферного воздуха. Пробы отбирают прокачиванием воздуха через измерительную камеру, перед которой помещают осушитель. Используя длинный шланг, с одной установки прибора можно отбирать пробы в нескольких точках.

Для получения достоверных результатов необходимо выбрать оптимальное число качаний насоса в конкретных условиях отбора проб без перекрытия шпура, так как в этом случае возможно разбавление подпочвенного воздуха атмосферным.

Частоту импульсов или ионизационный ток в камере измеряют сразу после отбора пробы. Но в зависимости от продолжительности отбора пробы, времени между отбором пробы и ее измерением и продолжительности измерений концентрация продуктов распада радона в камере будет различной. Градуировку эманометров проводят при 3-часовом накоплении продуктов распада радона, поэтому результаты измерений отдельных проб следует приводить к тем же условиям, вводя соответствующую поправку.

Обработка и интерпретация результатов. Концентрацию радона в пробах C_{Rn} рассчитывают по формулам:

– для сцинтилляционного прибора:

$$C_{Rn} = K \cdot P_1 \cdot (N_{\text{пр+ф}} - N_{\text{ф}}),$$

– для ионизационного прибора:

$$C_{Rn} = K \cdot P_2 \cdot J,$$

где $N_{\text{пр+ф}}$ – показания прибора от α -излучения пробы и фонового излучения, *имп/мин*;

$N_{\text{ф}}$ – показания прибора от фонового излучения, *имп/мин*;

J – ионизационный ток при измерении пробы, *деления шкалы/мин*;

P_1 , и P_2 – коэффициенты приведения показаний приборов к 3-часовому накоплению продуктов распада радона;

K – константа прибора.

В процессе проведения съемки легко установить природу аномалии. Если через 3–5 *мин* после введения эманации в измерительную камеру показания прибора увеличиваются, то аномалия радоновая. Если показания медленно убывают или не изменяются, то аномалия радоно-тороновая.

На участках со смешанными эманационными полями проводят радоно-тороновую съемку. Для определения концентраций радона и торона нужно дважды измерить одну и ту же пробу через интервал примерно 5 *мин*. Первое измерение, выполненное сразу после отбора и введения пробы в камеру, дает суммарный эффект от радона и торона, при втором измерении эффект дает только радон, так как торон за это время практически весь распадается.

Радоно-тороновую съемку можно проводить и с четырьмя измерениями – мгновенном, через 1 *мин*, через 2 *мин* и через 3 *мин* после введения пробы воздуха в камеру. Концентрация радона и торона в этом случае рассчитывается по формулам:

$$C_{Rn} = 1,5(N_1 - 0,5 \cdot N_0) \cdot K,$$

$$C_{Rn} = (N_2 - 0,2 \cdot N_0) \cdot K,$$

$$C_{Rn} = 0,8(N_3 - 0,1 \cdot N_0) \cdot K,$$

$$C_{Tn} = N_0 \cdot K - C_{Rn},$$

где N_0 , N_1 , N_2 , N_3 – показания прибора при мгновенном, одноминутном, двухминутном и трехминутном отсчетах.

Результаты эманационной съемки изображают в виде графиков концентрации эманации по профилям, на которые наносится схематическая геологическая основа. По результатам детальных работ строят карты изоэман.

Оценка аномалии проводится в два этапа – *предварительный* и *детальный*. *Предварительная оценка* производится сразу же после обнаружения аномалии. В двух–трех точках с максимальной концентрацией эманации определяется природа аномалии с помощью измерений при двух временах после отбора пробы. Если аномалия существенно радоновая, производят ее детализацию по двум–трем параллельным профилям, отстоящим на 10–25 м от основного профиля, обнаружившего аномалию.

На втором этапе производится детальная оценка аномалий на основе комплексных геолого-геофизических исследований, включая геологическое картирование аномального участка, наземную и шпуровую гамма-съемку, металлотрическое опробование рыхлых отложений на содержание урана и элементов-спутников и, наконец, вскрытие аномалий горными выработками.

При оценке аномалий учитывают следующие факторы:

1 Концентрация эманации является надежным признаком рудной или ореольной аномалии лишь при ее значениях свыше 1 000 *эман.*

2 Аномалии, связанные с ториевыми рудами, имеют ториевую природу, а с урановым оруденением – радоновую или реже смешанную природу; для аномалий эманирования характерна смешанная природа, а для стальных типов нерудных аномалий – радоновая или смешанная природа.

3 Одним из наиболее информативных факторов является изменение концентрации аномалий с глубиной в шпурах и мелких скважинах. Для рудных аномалий характерен непрерывный рост, причем с глубиной градиент концентраций растет. Для аномалий эманирования концентрация по глубине остается постоянной. Для остальных типов аномалий характерно выполаживание кривой или нерегулярные изменения с глубиной.

4 Изменение концентраций эманации в почвенном воздухе в зависимости от объема выкачиваемого воздуха, определяемое серией замеров при разном числе качания насоса. Дезэманирование, т. е. быстрое снижение активности по мере увеличения объема выкачанного воздуха, характерно для аномалий экранирования, слабое дезэманирование – для солевых ореолов. Рудные аномалии и аномалии эманирования не дезэманировуют.

5 Наличие повышенных концентраций урана и его спутников в рыхлых отложениях и изменение радиоактивности и содержания урана с глубиной, устанавливаемые измерениями на поверхности и в шпурах гамма-излучения или уранометрической съемкой, а для элементов спутников – с помощью спектрального или химического анализа. В рудных аномалиях γ -излучение и содержание урана закономерно повышаются с глубиной, в механических ореолах происходят резкие их колебания. Для аномалий эманирования и экранирования характерны нормальные γ -поле и содержание урана в наносах.

6 Форма и площадное распространение аномалий. Ореольные аномалии характеризуются широким площадным распространением и изометрической формой. Площадное распространение имеют и рудные аномалии. Форма аномалии в этом случае часто совпадает с формой рудного тела. Для аномалий экранирования характерно локальное распространение. Аномалии эманации имеют различную форму, часто линейную вытянутую, соответствующую зонам тектонического дробления и трещиноватости.

5.4 Методика проведения трековой съемки

В закопушки или скважины устанавливают специальные кассеты цилиндрической формы стандартного объема со свободным доступом воздуха, к дну которых прикреплены пленочные детекторы. Почвенный воздух за счет диффузионно-конвективного переноса заполняет кассеты, а образовавшийся в нем радон попадает на пленку и образует в ней треки. Наилучшие результаты можно получить, если кассеты установить на 25–30 суток, так как такая экспозиция исключает статистические вариации концентрации эманации.

В рыхлых отложениях кассеты устанавливают в закопушках на глубину 60–90 см дном кверху и засыпают грунтом.

При измерении радона в скважинах для всего изучаемого участка кассеты следует устанавливать на одну и ту же глубину.

В случае необходимости проведения эманационного трекового каротажа в скважину с нужным шагом опускают гирлянду из кассет, что позволяет изучить распределение эманации по оси скважины.

В обводненных наносах и на заболоченных участках трековую съемку следует проводить так, чтобы почвенные воды не попали на пленку и чтобы кассета не заполнялась водой полностью. Для этого часть кассеты, в которой закреплена пленка, герметизируют, а сами кассеты устанавливают вертикально, доньшком с пленкой кверху.

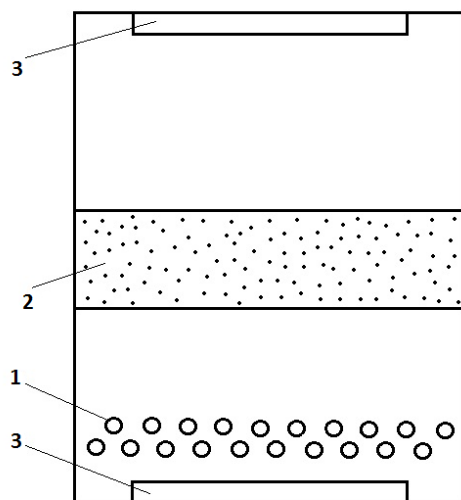
При измерении эманации в воде кассеты устанавливают на глубину 5–10 м ниже уровня зеркала грунтовых вод. К нижней части кассеты привязывают грузик, препятствующий ее переворачиванию и удалению воздушного пузыря, в который поступает радон из воды.

После экспонирования пленку вынимают из кассеты, протравливают, промывают, сушат и подсчитывают на ней плотность треков, которая зависит от концентрации эманации и от длительности экспозиции (если она меньше 25 суток).

Результаты эманационной съемки изображают в виде планов-графиков концентраций эманации или количества треков на 1 мм^2 пленки по профилям, на которые нанесена геологическая основа. По результатам дета-

лизационных работ (на аномальных участках) строят планы концентраций или плотности треков в масштабе проведенных работ.

Раздельное определение концентрации радона и торона при трековой съемке основано на различии в периодах полураспада этих нуклидов. Для таких определений берут две пленки, которые помещают на противоположные концы кассеты, разделенной на две части пористым фильтром (например, поролоном), чтобы увеличить время прохождения эманации от входных отверстий до одной из пленок (рисунок 9).



1 – входные отверстия; 2 – пористый фильтр; 3 – пленка

Рисунок 9 – Кассета для раздельного определения радона и торона при трековой съемке

Число треков на пленке, расположенной около входных отверстий,

$$N_{\text{общ}} = N_{Rn} + N_{Tn},$$

где N_{Tn} – число треков от торона;

N_{Rn} – число треков от радона.

Число треков на второй пленке:

$$N'_{\text{общ}} = AN_{Rn} + BN_{Tn},$$

где A и B – коэффициенты, определяющие долю эманации, прошедшей через фильтр.

Если концентрацией торона в верхней части кассеты можно пренебречь, то на верхней пленке будут регистрироваться треки только от урана N_U , т. е.

$$N = C \cdot N \cdot N_U = C \cdot N_{Rn},$$

где C – пересчетный коэффициент.

Коэффициенты A , B и C определяют градуировкой пленок в атмосфере чистот радона и торона, а проницаемость фильтра подбирают экспериментально.

Совместное решение уравнений позволяет определить концентрации радона и торона по формулам:

$$N_{Rn} = N_{\text{общ}} - \frac{N'_{\text{общ}} - B \cdot N_{\text{общ}}}{A - B},$$

$$N_{Tn} = \frac{N'_{\text{общ}} - B \cdot N_{\text{общ}}}{A - B},$$

$$N_{Rn} = \frac{N_U}{C},$$

$$N_{Tn} = N_{\text{общ}} - \frac{N_U}{C}.$$

5.5 Применение эманационной съемки

Эманационную съемку можно применять на различных этапах поисков месторождений радиоактивных руд, начиная от рекогносцировочных и кончая детальной разведкой и оценочными работами на месторождениях. Благоприятны для проведения эманационной съемки с отбором проб площади рыхлых отложений однородного состава с относительно постоянной мощностью (в пределах 1–3 м) и небольшими колебаниями нормального эманационного поля; неблагоприятны участки с хорошо обнаженными коренными породами, с каменными осыпями, с моренными отложениями, а также заболоченные и с многолетней мерзлотой.

Трековую эманационную съемку в отличие от съемки с отбором проб можно применять во влажных наносах и болотных почвах, а также в воде скважин и в поверхностных водах.

При поисках погребенного и невскрытого оруденения трековая съемка в скважинах предпочтительнее съемки с установкой кассет в закопушках.

Рекогносцировочную съемку применяют в комплексе с другими геофизическими методами и с целью выявления участков, перспективных для дальнейших поисков урана.

Профили эманационной съемки задают в крест простирания рудоконтролирующих геологических структур.

Вопросы для самоконтроля

- 1 На чем основана эманационная съемка?
- 2 Что считается эманационной аномалией?
- 3 Чем могут быть вызваны эманационные аномалии?
- 4 Какие способы регистрации α -излучения применяют при эманационной съемке?
- 5 Укажите особенности технологии выполнения эманационных измерений с отбором подпочвенного воздуха.
- 6 В чем состоит методика проведения трековой съемки?
- 7 В чем заключается сущность методики отдельного определения концентраций радона и торона в подпочвенном воздухе?

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:
ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПОЛЕВЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ
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. 2,8. Уч.-изд. л. 3,1.

Тираж 25 экз. Заказ 405.

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

