

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

М. Г. ВЕРУТИН, О. Н. КОБРУСЕВА

**ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ:
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ**

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: теоретические основы ядерной геофизики : практическое руководство / М. Г. Верутин , О. Н. Кобрусева ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – 45 с.
ISBN 978-985-577-755-8

В практическом руководстве рассматриваются вопросы, посвящённые теоретическим основам ядерной геофизики: виды радиоактивного распада, основные законы радиоактивных превращений, эффекты взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, количественные характеристики ионизирующих излучений.

Адресовано 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 978-985-577-755-8

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
1 Введение в ядерную геофизику.....	5
1.1 Предмет ядерной геофизики.....	5
1.2 Задачи, решаемые методами ядерной геофизики.....	6
1.3 Краткий исторический очерк развития ядерной геофизики.....	7
2 Радиоактивность.....	10
2.1 Естественная и искусственная радиоактивность.....	10
2.2 Виды радиоактивного распада.....	12
2.3 Одиночные радионуклиды и цепочки радиоактивных превращений.....	15
3 Законы радиоактивных превращений.....	17
3.1 Основной закон радиоактивного распада.....	17
3.2 Закон накопления радиоактивных элементов.....	18
3.3 Подвижное радиоактивное равновесие.....	19
3.4 Устойчивое радиоактивное равновесие.....	20
4 Единицы измерения радиоактивности.....	21
4.1 Единицы активности.....	21
4.2 Единицы дозы.....	23
4.3 Характеристики поля ионизирующих излучений.....	24
5 Основные свойства радиоактивных элементов.....	26
5.1 Физико-химические свойства урана, радия, тория и калия.....	26
5.2 Распределение радиоактивных элементов в земной коре.....	28
5.3 Нарушения радиоактивного равновесия в урановых рудах.....	30
5.4 Эманирование радиоактивных руд и минералов.....	32
6 Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом.....	34
6.1 Взаимодействие альфаизлучения с веществом.....	34
6.2 Взаимодействие бетаизлучения с веществом.....	35
6.3 Взаимодействие гаммаизлучения с веществом.....	37
6.4 Взаимодействие нейтронного излучения с веществом.....	41
Литература.....	45

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 охватывает физико-геологические основы ядерной геофизики. В нем рассматриваются виды радиоактивного распада, основные законы радиоактивных превращений, эффекты взаимодействия ионизирующих излучений с веществом. Отдельный раздел посвящен количественным характеристикам ионизирующих излучений (активность радионуклида, дозы излучения, мощности дозы излучения) и единицам их измерения в системах СИ и СГС.

Кроме этого, в руководстве уделяется внимание радиоактивным рядам и одиночным естественным радионуклидам, которые обуславливают естественную радиоактивность горных пород и руд, а так же дается оценка радиоактивности горных пород разных генетических типов и радиоактивности поверхностных и подземных вод.

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

Практическое руководство «Ядерно-геофизические методы исследований: теоретические основы ядерной геофизики» 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 ВВЕДЕНИЕ В ЯДЕРНУЮ ГЕОФИЗИКУ

1.1 Предмет ядерной геофизики.

1.2 Задачи, решаемые методами ядерной геофизики.

1.3 Краткий исторический очерк развития ядерной геофизики.

1.1 Предмет ядерной геофизики

Ядерно-геофизическая разведка включает в себя группу методов, основанных на изучении *естественной и искусственной радиоактивности*. Естественная радиоактивность обусловлена распадом радиоактивных элементов, находящихся в горных породах, рудах, воде и газовых включениях.

Искусственная радиоактивность возникает при воздействии на породу ионизирующим излучением. Тип вторичного излучения, его интенсивность и энергетическое распределение зависят от вещественного состава и физических свойств пород.

Методы, использующие для изучения геологического строения, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых естественную радиоактивность, нередко выделяют в самостоятельный раздел – *радиоактивные методы разведки или радиометрию*.

Методы, основанные на использовании искусственных источников ионизирующих излучений, относят к *ядерно-физическим методам*. Ядерная геофизика отличается «близко-действием», т. е. малой глубиной исследований вследствие быстрого поглощения ядерных излучений окружающими породами и воздухом. Однако продукты радиоактивного распада способны мигрировать, образуя вокруг пород и руд газовые, водные и механические ореолы рассеяния, по которым можно судить о радиоактивности коренных пород.

Основными методами радиометрии являются *гамма-съемка* (ГС), при которой изучают интенсивность гамма-излучения, и *эманационная съемка* (ЭС), при которой по естественному альфа-излучению почвенного воздуха определяют концентрацию в нем радона – радиоактивного газа. Гамма-методы (ГМ) служат для поисков и разведки не только радиоактивных руд урана, радия, тория и других элементов, но и парагенетически или пространственно связанных с ними нерадиоактивных полезных ископаемых (редкоземельных, металлических, фосфатных и др.). С их помощью можно определять абсолютный возраст горных пород. Гамма- и эманационную съемки используют также для литологического и тектонического

картирования и решения других задач. По виду используемых при измерениях излучений радиометрические методы подразделяются на α -, β -, и γ -методы. По области применения – на *полевые методы, методы каротажа, методы радиометрического опробования и лабораторные радиометрические методы.*

Искусственная радиоактивность возникает при облучении горных пород и сред гамма-квантами или нейтронами. Измеряя те или иные характеристики наведенного поля, можно судить о гамма- и нейтронных свойствах горных пород, которые определяются химическим составом элементов и физическими свойствами пород. Существует множество искусственных ядерно-физических методов определения химического состава и физических свойств горных пород, основанных на использовании либо нейтронов (нейтрон-нейтронные, нейтрон-гамма и др.), либо гамма-излучений (гамма-гамма, гамма-нейтронный, рентгенорадиометрический и др.). Методы ядерной геофизики подразделяют на аэрокосмические, полевые, подземные, лабораторные, но наибольшее применение находят скважинные ядерные методы.

1.2 Задачи, решаемые методами ядерной геофизики

Основной задачей *лабораторных* радиометрических методов является определение концентрации радиоактивных элементов в образцах горных пород. Полученные результаты используются при поисково-разведочных работах, оценке абсолютного возраста геологических образований и ряда других.

Полевые радиометрические методы (радиометрическая съемка) применяются для приближенной оценки радиоактивности горных пород и изучения ее изменений по маршруту, профилю или по заданной сетке. Основная цель – поиск месторождений радиоактивных руд, геологическое и геохимическое картирование, выделение контактов пород и маркирующих горизонтов, а также для поисков полезных ископаемых, парагенетически связанных с радионуклидами (редкие земли, фосфор и др.).

Эманиационные методы используются для изучения радиоактивных эманацій с целью поисков радиоактивных элементов. Кроме того, этот метод, используется при решении геолого-экологических задач (обследование жилых и рабочих зданий и помещений) и прогнозировании землетрясений.

Основными задачами, решаемыми методами ядерной геофизики, являются:

– расчленение горных пород, оконтуривание рудных зон, определение мощности рудных тел и содержания полезных компонентов в разрезах поисково-разведочных и эксплуатационно-разведочных скважин;

– определение элементного состава горных пород и руд в горных выработках, на выходах коренных пород и в наносах;

– определение содержания металлов в различного рода пробах – керновых, шламовых и т. д. на месте их отбора;

– определение ряда физических свойств (плотность, пористость, влагонасыщенность и пр.) горных пород и руд прежде всего в естественном залегании, без отбора проб.

По сравнению с методами геологического опробывания эти методы обладают большей представительностью и позволяют точнее определять глубину залегания, мощность и строение рудных тел. В настоящее время методы ядерной геофизики используют при подсчете запасов многих видов полезных ископаемых: бериллия, плавикового шпата, хромитов и др.

1.3 Краткий исторический очерк развития ядерной геофизики

Впервые идея об использовании ядерных свойств элементов, входящих в состав горных пород, в геологии была высказана непосредственно после открытия радиоактивности. Уже в 1902 г. Пьер Кюри, а затем английский физик Э. Резерфорд высказали мысль о том, что скорость радиоактивного распада элементов может быть использована в качестве эталона времени для определения возраста горных пород. В 1907 г. эта идея получила практическое осуществление.

Б. Болтвуд по содержанию в породах урана и конечного продукта его распада – свинца сделал первые определения абсолютного возраста некоторых минералов. Полученные им значения возраста (240–320 млн. лет) оказались несравнимо большими, чем это представлялось ранее на основании чисто геологических данных. В дальнейшем радиологические методы определения возраста минералов горных пород непрерывно совершенствовались и расширялись. Кроме свинцового метода был разработан *гелиевый, аргоновый, рубидиево-стронциевый* и другие.

Параллельно с разработкой радиологических методов определения возраста пород исследуется распределение радиоактивных элементов в земной

коре и тепла, выделяющегося при распаде естественных радиоактивных элементов. Уже первые обобщения результатов этих исследований приводят в 1905–1907 гг. английских ученых Р. Стретта (Рэлея) и Д. Джолли к мысли о том, что радиоактивные элементы играют весьма важную роль в геологической истории Земли. В дальнейшем, по мере накопления фактического материала, эта идея получала все большее и большее подтверждение. Появляется ряд гипотез о роли радиоактивности в тепловом режиме Земли, в динамике земной коры, в генезисе нефти и т. д. В начале 30-х гг. проблемы радиологических методов определения возраста пород, влияния радиоактивности на тепловой режим Земли и ее геологическую историю определились настолько отчетливо, что выделились в самостоятельную отрасль геологии – радиогеологию. Основоположником радиогеологии как самостоятельной ветви геологической науки является советский ученый – академик В. И. Вернадский. Большой вклад в ее зарождение и развитие внесли наши ученые А. Е. Ферсман, В. Г. Хлопин, К. А. Ненадкевич, А. П. Соколов, А. П. Герасимов, И. Е. Старик, Г. В. Войткевич, В. И. Баранов и др.

С открытием стабильных изотопов элементов на вооружение радиологических методов определения возраста пород приходит масспектроскопия. В 1932 г. английский геолог А. Холмс предложил использовать возможные колебания изотопного состава элементов для петрогенетических исследований. В дальнейшем советские и зарубежные ученые (В. И. Виноградов, Р. П. Тейс, Э. М. Галимов, А. Нир, Г. Юри и др.) показали возможность использования сведений о природных колебаниях изотопного состава элементов для решения ряда других, не менее важных геологических задач: определения палеотемператур, выяснения истории формирования горных пород и полезных ископаемых и т. п.

В связи с открытием радиоактивности разрабатываются методы ее исследований, а также методы поисков радия и других радиоактивных элементов, основанные на регистрации их излучений. Мощным толчком к развитию этих методов послужила проблема поисков, разведки и разработки месторождений нового вида энергетического сырья – урана. С этой целью значительно усовершенствуется измерительная аппаратура и методика радиометрической съемки: наземной, автомобильной и воздушной. Разрабатывается теория методов съемки, усовершенствуется методика проведения измерений и интерпретации. Внедряются в практику сцинтилляционные счетчики, позволяющие исследовать не только суммарную концентрацию в породах радиоактивных элементов, но и отдельное содержание урана, радия, тория и калия. Наряду с поисками урана результаты радиометрической съемки находят применение при решении других

задач прикладной геологии: геологического картирования, выявления и прослеживания дизъюнктивных нарушений, наземных поисков месторождений нерадиоактивных полезных ископаемых.

Одновременно с радиометрической съемкой разрабатываются и интенсивно внедряются в практику радиометрические методы исследования скважин. В 1933 г. советские геофизики Г. В. Горшков, Л. М. Курбатов и А. В. Шпак предложили метод исследования разрезов скважин по интенсивности естественного гамма-излучения пород. В 1941 г. известный физик Бруно Понтекорво опубликовал первые сведения о нейтронном гамма-методе исследования скважин. В 50-е гг. начата разработка методов плотности тепловых и надтепловых нейтронов, метода рассеянного гамма-излучения, метода радиоактивных изотопов. В настоящее время радиометрические методы являются одним из основных видов геофизического исследования скважин.

В конце 50-х гг. геология обогатилась новым комплексом ядерных методов исследования: активационным, фотонейтронным, гамма-спектроскопическим, рентгенорадиометрическим и другими. В своей совокупности эти методы позволяют проводить экспрессный поэлементный анализ образцов горных пород без сложных и трудоемких химических определений, а в ряде случаев осуществлять такой анализ непосредственно в скважинах.

В разработку и развитие радиометрической съемки и ядерных методов исследования горных пород большой вклад внесли советские ученые М. М. Соколов, Г. В. Горшков, А. Г. Граммаков, Л. Ч. Пухальский, В. И. Баранов, Ю. П. Булашевич, В. Н. Дахнов, Ф. А. Алексеев, В. А. Мейер, Д. И. Лейпунская, А. Л. Якубович и многие другие.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Что такое ядерная геофизика?
- 2 Перечислите основные радиометрические методы.
- 3 Перечислите основные ядерно-физические методы.
- 4 Какие задачи решаются с помощью лабораторных радиометрических методов?
- 5 Для чего применяют полевые радиометрические методы?
- 6 Какие задачи, решают методами ядерной геофизики?
- 7 Опишите историю развития методов поисков радиоактивных элементов.
- 8 Какова роль отечественных ученых в создании и развитии радиометрических и ядерно-физических методов?
- 9 Какова роль зарубежных ученых в создании и развитии ядерной геофизики?

2 РАДИОАКТИВНОСТЬ

2.1 Естественная и искусственная радиоактивность.

2.2 Виды радиоактивного распада.

2.3 Одиночные радионуклиды и цепочки радиоактивных превращений.

2.1 Естественная и искусственная радиоактивность

Атомы состоят из ядер, окруженных электронами, и имеют форму, близкую к сферической. Связь между отрицательно заряженными электронами и положительно заряженным ядром атома осуществляется за счет сил кулоновского взаимодействия. Под энергией связи электрона с ядром понимают ту энергию, которую необходимо затратить для того, чтобы удалить электрон из атома в бесконечность. Энергия связи электронов с ядром зависит от заряда ядра и состояния электрона. Заряд ядра атома определяется числом протонов и обозначается через Z . Число Z совпадает с порядковым номером элемента в периодической таблице Менделеева.

В атоме может быть несколько электронных оболочек (K , L , M и т. д.). Наиболее прочно с ядром связаны электроны ближайшей к нему K -оболочки.

Величину энергии связи электрона в атоме выражают в электронвольтах (эВ) или в производных от них единицах – килоэлектронвольтах (КэВ) и мегаэлектронвольтах (МэВ). *Электронвольт* – это величина кинетической энергии, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов в один вольт.

Энергия связи электрона K -оболочки: у водорода равна $13,5 \text{ эВ}$, у алюминия – $1,56 \text{ КэВ}$, у свинца – $87,80 \text{ КэВ}$.

Все ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, за исключением ядра обычного водорода, состоящего из одного протона. Массы протонов и нейтронов почти одинаковы и примерно в 2 000 раз больше массы электрона. Электрический заряд протона равен по абсолютной величине заряду электрона, но противоположен ему по знаку, нейтрон же вообще не заряжен. Современная квантовая механика рассматривает протоны и нейтроны как различные зарядовые квантовые состояния одной частицы – *нуклона*.

Число нуклонов в ядре определяет его атомный вес, называемый часто также массовым числом или массой и обозначаемый через A . За единицу массы в ядерной физике берут массу нуклона.

Очевидно, что масса ядра:

$$A = Z + N,$$

где N – число нейтронов в ядре.

Ядра, содержащие одинаковое число протонов, но разное число нейтронов, называются *изотопами*. Большинство элементов в природе представляет собой смесь двух или большего числа изотопов, химически не различимых друг от друга.

Ядра с одинаковыми массовыми числами, но разными Z и N называются *изобарами*, ядра с одинаковым числом нейтронов, но разными Z и A называются *изотопами*.

Связь между нуклонами в ядре осуществляется так называемыми внутриядерными силами.

Все химические элементы, слагающие окружающий мир, в том числе и Землю, характеризуются стабильными и радиоактивными свойствами.

Стабильные химические элементы под воздействием различных излучений и частиц могут стать радиоактивными.

Такой вид вызванной (или наведенной) радиоактивности называют – *искусственной радиоактивностью*.

Радиоактивность элементов, наблюдаемая в природе и возникающая в ядрах элементов (без прямого вмешательства человека) называется *естественной радиоактивностью*.

Радиоактивными элементами называются такие, ядра атомов которых с течением времени претерпевают самопроизвольный распад и превращаются в атомы других элементов с иными физическими и химическими свойствами.

Это явление происходит с ядрами атомов, в которых число нейтронов n значительно преобладает над числом протонов p – это обстоятельство делает ядро малоустойчивым.

Так, например, в начале таблицы Менделеева отношение $n/p \cong 1$, а в конце $n/p > 1,5$. Значит, неустойчивые ядра должны находиться в конце таблицы.

Это обстоятельство подтверждено фактом, что среди элементов с $Z > 83$ (Bi) и массовым числом $A = 208$ нет устойчивых ядер.

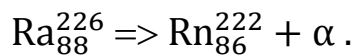
Впервые радиоактивность была замечена в 1896 г. Анри Беккерелем у некоторых солей урана, а два года спустя Пьер и Мария Кюри открыли радиоактивность тория, полония и радия.

В 1934 г. супругами Жюлио-Кюри при помощи ядерных реакций были получены искусственные радиоактивные элементы.

2.2 Виды радиоактивного распада

Для естественных радиоактивных элементов известны несколько видов радиоактивных превращений (термин «распад» считается не совсем точным определением данного физического явления природы).

Альфа-распад – это распад с испусканием α -частицы, представляющей собой положительно заряженное ядро гелия с массовым числом $M = 4$, атомным номером (зарядом) $Z = 2$. Уменьшение заряда атома на две единицы приводит также к испусканию двух электронов с наружных оболочек атома. В результате этого вновь полученный при α -распаде элемент перемещается в периодической системе элементов Д. И. Менделеева на две клетки влево. Например,



Известно около 160 α -активных ядер. Подавляющая часть их распадается в конце периодической системы и обладает $Z > 82$. Времена жизни α -активных ядер колеблются в очень широких пределах: от $3 \cdot 10^7$ с для Po^{212} до $5 \cdot 10^{15}$ лет для Ce^{142} . Энергии α -распада всех тяжелых ядер заключены в пределах 4–9 МэВ.

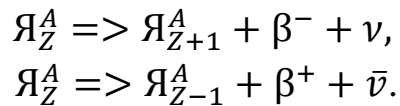
Энергетический спектр альфа-частиц, испускаемых определенным радиоактивным изотопом, линейчатый. Величина энергии альфа-частиц для различных изотопов изменяется в пределах от 4 до 10 МэВ.

Бета-распад – распад с испусканием электронов и позитронов. Бета-распад происходит при превращении в ядре нейтронов в протоны и наоборот. Первый из этих процессов приводит к появлению *электронов* (e^-), второй – *позитронов* (e^+). Каждый из этих процессов сопровождается вылетом нейтральной частицы – *нейтрино* (ν) или *антинейтрино* ($\bar{\nu}$).

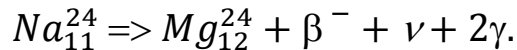
При испускании ядром электрона заряд ядра увеличивается на одну единицу, и образующийся изобар перемещается в периодической системе на одну клетку вправо, а при испускании позитрона заряд ядра уменьшается на единицу, и образующийся изобар перемещается на одну клетку влево. Увеличение заряда ядра на одну единицу приводит к захвату электрона, а его уменьшение – к испусканию электрона из наружной оболочки атома.

При β -распаде энергия распределяется между тремя частицами: позитроном или электроном, нейтрино и ядром, поэтому позитроны и электроны при β -распаде обладают в отличие от альфа-частиц сплошным спектром энергий.

Символически оба процесса β -распада записываются в следующем виде:



Во многих случаях частицами уносятся не вся энергия реакции распада. В этом случае остаток энергии испускается в виде одного или нескольких γ -квантов:

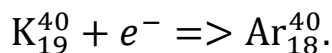


Максимальная энергия бета-частиц может быть оценена по разности масс исходного и конечного ядер. Величина максимальной энергии бета-частиц у отдельных изотопов может достигать 5 МэВ.

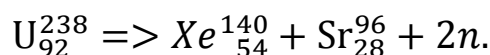
Период полураспада бета-излучающих изотопов меняется от долей секунды до многих миллионов лет.

Электронный захват – это процесс захвата ядром электрона с одной из ближайших к нему оболочек, в результате чего в ядре один протон превращается в нейтрон и из ядра вылетает нейтрино.

Захват чаще всего происходит с ближайшей к ядру *K*-оболочки, так называемый *K*-захват. Вакантное место захваченного ядром *K*-электрона заполняется электроном с внешней оболочки, в результате чего образуются γ -квант и квант мягкого рентгеновского излучения (возникает *характеристическое рентгеновское излучение*). Из естественных радиоактивных элементов путем *K*-захвата распадается радиоактивный изотоп калия K^{40} . При этом атом K^{40} переходит в Ar^{40} :



Спонтанное деление ядра – это вид радиоактивного превращения, сопровождающийся расщеплением ядра на два осколка примерно одинакового атомного веса и испусканием 2–3 нейтронов. Самопроизвольное деление ядер наиболее характерно для самых тяжелых элементов (урана и тория):



На принципе деления ядра основано использование актиноурана в качестве материала для атомных бомб и в качестве энергетического топлива в некоторых типах атомных электростанций.

Гамма (электромагнитное) излучение, сопутствующее радиоактивному распаду ядер атомов, не является самостоятельным видом излучения, приводящего к превращению ядра, а сопровождает излучение тех или иных заряженных частиц (α , β , K -захват).

Возникновение γ -квантов при α - , β -распаде обусловлено тем, что некоторые из дочерних (образовавшихся вследствие выброса α - или β -частицы) ядер оказываются в возбужденном состоянии и при переходе в нормальное состояние избыток энергии излучают в виде кванта электромагнитной энергии. При этом переход из возбужденного состояния может осуществляться через промежуточные уровни. Тогда такой переход после испускания частицы будет сопровождаться испусканием нескольких (двух и более квантов разных энергий).

Энергия гамма-кванта:

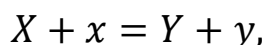
$$E_{\gamma} = h\nu,$$

где h – постоянная Планка (равная $6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с);

ν – частота колебаний электромагнитной волны.

Ядерные реакции происходят как при взаимодействии элементарных частиц (нейтронов, протонов и т. д.) с атомными ядрами или одних атомных ядер с другими атомными ядрами, так и при самопроизвольном распаде ядер. По аналогии с химическими превращениями атомов и молекул ядерные превращения называют ядерными реакциями.

Запись ядерных реакций аналогична принятой в химии: слева обычно пишут символы частиц, вступающих в реакцию, а справа – ее продукты, например:



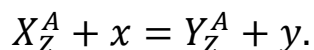
где X – ядро мишени;

x – бомбардирующая частица;

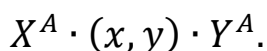
Y – конечное ядро (ядро-продукт);

y – вылетающая частица.

Около знаков символов элементов обычно записывают массовое число изотопа (справа сверху) и заряд его ядра (слева снизу):



Для сокращения Z обычно опускают и реакцию записывают следующим образом:



Исходя из вышесказанного *естественная радиоактивность* – это самопроизвольный распад неустойчивых атомных ядер, спонтанно превращающихся в ядра других элементов, сопровождается испусканием *альфа*-, *бета*- частиц, *гамма*-квантов и другими процессами.

2.3 Одиночные радионуклиды и цепочки радиоактивных превращений

В настоящее время известно более 50 естественных радиоактивных элементов. К ним относятся *тяжелые элементы*, входящие в состав радиоактивных семейств, и *более легкие* радиоактивные элементы, распад которых ограничивается одним звеном превращений.

Природные радионуклиды с порядковыми номерами от 81 (Таллий) до 92 (Уран) образуют три радиоактивных ряда (семейства) – *урана* U^{238} , *актиноурана* $AcU (U^{235})$, *тория* Th^{232} и *нептуния* Np^{237} . Представители последнего ряда в природе встречаются в ничтожно малых количествах. Относительно короткоживущий родоначальник этого семейства $Np^{237} (T_{1/2} = 2,25 \cdot 10^6 \text{ лет})$ был получен искусственно при бомбардировке урана быстрыми нейтронами.

В этих рядах каждый радионуклид возникает из предыдущего и превращается в последующий до тех пор, пока не образуется устойчивый изотоп элемента.

Распадающийся нуклид называют *материнским*, а вновь образующийся – *дочерним*. Нуклид, с которого начинается ряд, называется *родоначальником ряда*.

Каким бы путем не распадался нуклид (изотоп), число атомных ядер, распавшихся в единицу времени, пропорционально числу имевшихся ядер.

Распад семейств *урана*, *тория* и *актиноурана* имеет много общего:

- родоначальники семейств характеризуются самыми большими массовыми числами и относятся к наиболее долгоживущим;
- в первой половине цепи превращений каждого семейства распад сопровождается преимущественно испусканием α -частиц, во второй половине преобладает β -распад (рисунок 1);
- в середине цепи превращений каждого семейства имеются радиоактивные газы – *эманации*, относящиеся к группе инертных (Rn^{222} , $Th(Rn^{220})$ и $An(Rn^{219})$);
- за эманациями следуют группы короткоживущих элементов, часть атомов которых распадается с испусканием α -частиц, а другая часть – β -частиц. Эти элементы образуют разветвления рядов – «вилки»;

– каждый ряд заканчивается стабильным изотопом свинца (Pb^{206} , Pb^{207} и Pb^{208});

– все члены рядов U, U и Th имеют по два названия, так, например, ^{234}Th называется еще ураном $X_1(UX_1)$, ^{210}Po – радием F (RaF) и т. д.

Несмотря на некоторую трудность использования двух рядов названий, старые названия употребляются и в настоящее время, поскольку они указывают на принадлежность изотопа к определенному семейству. Их запоминание несколько облегчается тем, что во всех трех семействах продукты с индексами A, C, F являются изотопами полония, с индексами C и E – изотопами висмута, с индексами B, D и G – свинца, C'' и E'' – таллия. Конечным продуктом распада всех трех семейств являются стабильные изотопы свинца, которые принято обозначать также RaG, AcD и ThD соответственно.

К числу радиоактивных элементов, не входящих в состав рассмотренных семейств, относятся изотопы калия (K^{40}), рубидия (Rb^{87}), индия (In^{155}), самария (Sm^{147}), лютеция (Lu^{176}), рения (Re^{87}) и др.

Все одиночные радиоактивные изотопы характеризуются весьма большими периодами полураспада ($T_{1/2} > 10^9$ лет). За исключением самария, вольфрама и висмута они распадаются путем K-захвата и β -распада, превращаясь в устойчивый изотоп нового элемента.

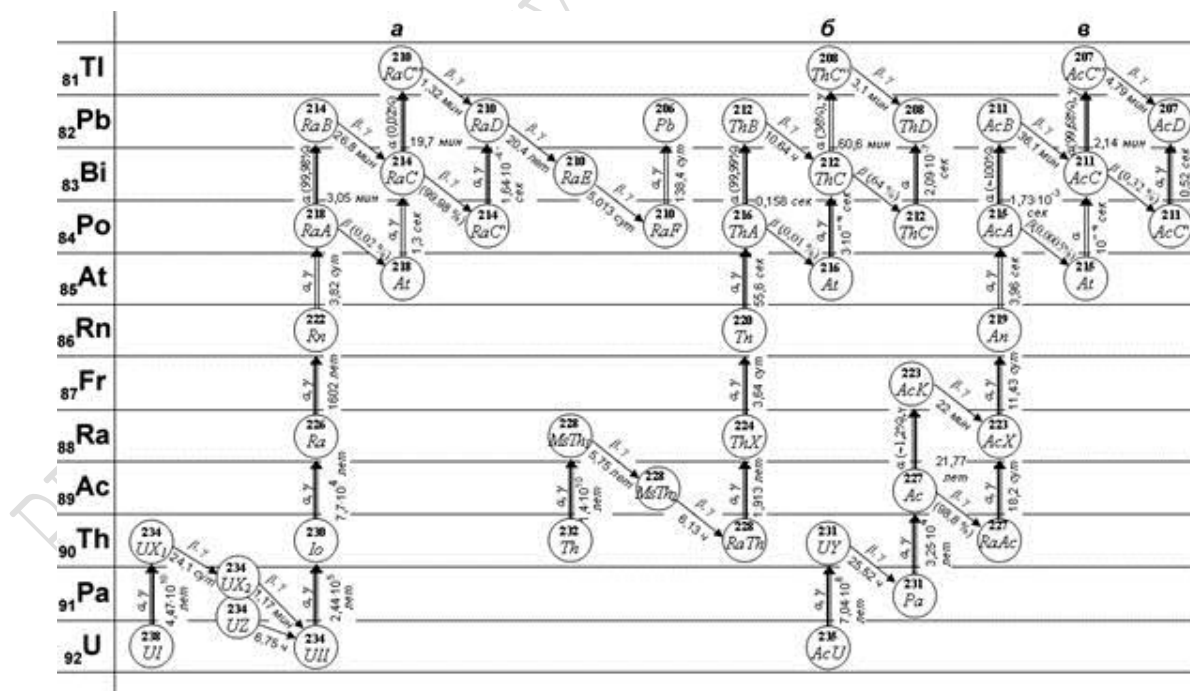


Рисунок 1 – Цепочки распада урана, тория и актиноурана

Вопросы для самоконтроля

- 1 В каких единицах выражают энергию связи электрона в атоме?
- 2 Чем определяется заряд ядра атома?
- 3 Как называются ядра с одинаковым числом протонов, но разным числом нейтронов?
- 4 Перечислите основные виды радиоактивного распада.
- 5 Что такое гамма-излучение?
- 6 Перечислите основные природные радиоактивные семейства.
- 7 Какие общие черты характерны для природных радиоактивных семейств?
- 8 Каким изотопом заканчиваются радиоактивные семейства урана, актиноурана и тория?

3 ЗАКОНЫ РАДИОАКТИВНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

- 3.1 Основной закон радиоактивного распада.
- 3.2 Закон накопления радиоактивных элементов.
- 3.3 Подвижное радиоактивное равновесие.
- 3.4 Устойчивое радиоактивное равновесие.

3.1 Основной закон радиоактивного распада

Распад радиоактивного ядра подчиняется определенному закону, сформулированному Э. Резерфордом и Ф. Содди в 1902 г.

Физический смысл закона радиоактивного распада заключается в том, что распад отдельного атома есть явление случайное (т. е. подчиняется закону теории вероятностей).

Согласно этой теории каждое радиоактивное ядро распадается независимо от других ядер, и поэтому количество ядер радиоактивного элемента dN , распавшихся за бесконечно малый промежуток времени dt , будет пропорционально числу ядер N , не распавшихся к моменту времени t :

$$-dN = \lambda N dt ,$$

где знак « $-$ » указывает, что имеет место убыль в числе атомов радиоактивного вещества;

λ – постоянная радиоактивного распада. Она характеризует вероятность распада атома и показывает, какая часть общего числа атомов распадается за единицу времени (размерность c^{-1}).

Интегрируя полученное уравнение по t от 0 до t и по N от N_0 (число радиоактивных атомов при $t = 0$) до N , получим

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

Из этого уравнения следует, что радиоактивный распад подчиняется экспоненциальному закону. В полулогарифмическом масштабе это уравнение представляет прямую, угловой коэффициент которой определяет постоянную распада.

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

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

Связь между константами λ и $T_{1/2}$ выражается формулой

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

Зная постоянную распада λ , можно определить среднюю продолжительность жизни τ радиоактивного атома:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 1,44 \cdot T_{1/2}.$$

Практически полный распад (с точностью до 0,1 % от начального количества атомов) наступает за время $t = 10T_{1/2}$.

3.2 Закон накопления радиоактивных элементов

При радиоактивном распаде элементов из числа членов естественных радиоактивных семейств происходит уменьшение числа атомов одного изотопа (называемого *материнским*) и накопление другого (*дочернего*).

Часто бывает так, что дочерний изотоп является радиоактивным, поэтому его количество в начальный момент времени равно нулю. В дальнейшем число атомов материнского (N_1) и дочернего (N_2) элемента будет зависеть от их постоянных распада.

Количество накопившегося со временем дочернего радиоактивного элемента может быть рассчитано по формуле

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{02} \cdot e^{-\lambda_2 t} = N_{21} + N_{22}.$$

Первый член в правой части этого выражения характеризует накопление атомов N_2 за счет распада материнского элемента.

Второй член характеризует распад дочернего элемента, если к началу наблюдений имелось N_{02} его атомов.

Если к началу наблюдения атомы дочернего элемента отсутствуют, то

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}). \quad (1)$$

Точка максимума на кривой $N_{21}(t)$ соответствует абсциссе:

$$t_p = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

Для случая n последовательно распадающихся радиоактивных элементов число атомов n -го вещества будет иметь вид:

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

3.3 Подвижное радиоактивное равновесие

Радиоактивное равновесие – соотношение между числом атомов материнского и дочерних радионуклидов радиоактивного семейства, при котором для каждого дочернего радионуклида число образующихся атомов равно числу распадающихся.

В случае, когда исходный элемент распадается медленнее продукта его распада $\lambda_1 < \lambda_2$, то первое и второе вещества будут существовать вместе до полного распада. Однако через промежуток времени после начала распада, достаточно большой по сравнению с продолжительностью жизни атомов дочернего вещества ($t > 10T_{1/2}$), наступит состояние, при котором отношение количеств исходного вещества и продуктов его распада стремится к некоторому постоянному значению:

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

Такое состояние называется *подвижным равновесием*.

Примером такого равновесия является равновесие между Rn и продуктами его распада.

Время наступления подвижного равновесия находится из формулы (1) при условии, что выражение в скобках равно 0,999. Выполнив преобразования, получим

$$t_{\text{пр}} = \frac{0,693}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{10T_1T_2}{T_1 - T_2}.$$

3.4 Устойчивое радиоактивное равновесие

Если исходное вещество распадается несоизмеримо медленнее продукта его распада $\lambda_1 \ll \lambda_2$, т. е. материнский нуклид долгоживущий, то выражение для N_2 примет вид:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) = N_{2p} (1 - e^{-\lambda_2 t}),$$

где N_{2p} – равновесное количество дочернего нуклида.

Кривая накопления $N_2(t)$ спустя время, равное больше, чем 10 периодов полураспада дочернего элемента $t \geq 10(T_{1/2})_2$, выходит на асимптоту. Наступает такое состояние, когда число распадающихся атомов исходного радиоактивного вещества равно числу распадающихся атомов продукта его распада. Убыль дочернего вещества вследствие распада полностью компенсируется его образованием из исходного. Соотношение же между количествами этих изотопов остается постоянным и равным:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2.$$

Это состояние называется *устойчивым равновесием*.

Классическим примером устойчивого радиоактивного равновесия является равновесие между ураном ($T_{1/2} = 4,49 \cdot 10^9$ лет) и радием ($T_{1/2} = 1540$ лет), которое наступает по истечении длительного промежутка времени ($T \sim 16\,000$ лет) и наблюдается только в древних хорошо сохранившихся горных породах и минералах. При радиоактивном равновесии одному грамму урана соответствует $3,4 \cdot 10^{-7}$ г радия.

Наличие устойчивого радиоактивного равновесия в радиоактивных семействах имеет важное значение, так как позволяет судить о содержании в породах радиоактивных элементов по результатам измерений других элементов рассматриваемого семейства.

Процессы радиоактивного распада носят статистический характер, т. е. число атомов радиоактивного элемента, распадающихся в единицу времени, не строго постоянно, а колеблется около некоторого среднего значения.

Вопросы для самоконтроля

1 В чем суть закона радиоактивных превращений и его математическое отображение?

2 Каковы основные константы закона радиоактивного распада?

3 Какова размерность постоянной радиоактивного распада?

4 Что такое радиоактивное равновесие?

5 Сформулируйте условия наступления подвижного равновесия.

6 Сформулируйте условия наступления устойчивого равновесия.

7 Что нам дает наличие устойчивого радиоактивного равновесия в радиоактивных семействах?

4 ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ

4.1 Единицы активности.

4.2 Единицы дозы.

4.3 Характеристики поля ионизирующих излучений.

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

4.1 Единицы активности

Абсолютная радиоактивность элементов оценивается числом распадов в 1 с. Единицей активности в системе СИ принят беккерель (Бк). Беккерель

рель равен активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором за 1 с происходит один распад.

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

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

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

а массу изотопа (в г), излучающего эту активность, по формуле

$$m_{\text{и}} = \frac{N \cdot A}{A_{\text{АВ}}} = 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot M \cdot T_{1/2},$$

где A – атомная масса изотопа;

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

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

Из этой формулы видно, что масса радиоактивных элементов, соответствующая активности 1 Ки, возрастает с увеличением периода полураспада. Если, например, для полония ($T_{1/2} = 138$ дня) эта масса равна 0,22 мг, для радия ($T_{1/2} = 1590$ лет) – 1 г, то для урана ($T_{1/2} = 4,49 \cdot 10^9$ лет) она равна 3 т.

В практике часто используются единицы, производные от кюри: *милликюри* (10^{-3} Ки), *микрокюри* (10^{-6} Ки) и *нанокюри* (10^{-9} Ки). Единицей концентрации радиоактивного изотопа в некотором веществе является Ки/кг и ее производные (Ки/г), а также Ки/м³ и ее производные.

Несколько сложнее определять активности препаратов, используемых в качестве источников гамма-квантов, поскольку число гамма-квантов, сопровождающих α - или β -распад, для каждого изотопа различно. Поэтому для сопоставления различных излучателей друг с другом их активности выражают не в кюри, а в *грамм-эквивалентах радия (г-экв Ра)*. Величина 1 г-экв Ра равна такому количеству какого-либо радиоактивного изотопа, интенсивность гамма-излучения которого эквивалентна интенсивности излучения 1 г Ра в равновесии с продуктами распада. Активность 1 г Ра, как известно, примерно равна 1 кюри. Производной единицей грамм-эквивалента радия является миллиграмм-эквивалент радия.

Переход от *кюри* к *грамм-эквивалентам радия* для любого изотопа производится по формуле

$$Q = C \cdot q,$$

где C – коэффициент перехода для данного изотопа;

q – активность изотопа в *кюри* (Ku).

Концентрация радона и других газообразных радиоэлементов выражается в единицах *кюри на литр* ($Ku/л$) и в единицах *эман* ($1 \text{эман} = 10^{10} Ku/л = 10^{-7} Ku/м^3$, $1 Bк/л = 0,27 \text{эмана}$).

4.2 Единицы дозы

Для количественной оценки воздействия радиоактивных излучений на облучаемую среду используют дозы излучения.

Различают *поглощенную, экспозиционную и эквивалентную дозы*.

Поглощенная доза (D) определяется как энергия излучения любого вида, поглощенная единицей массы любого вещества, и может измеряться в *джоулях на килограмм* ($Дж/кг$) или в *эргах на грамм* ($эрг/г$).

Единица поглощенной дозы в СИ – *грей* ($Гр$). Грей равен поглощенной дозе излучения, при которой веществу массой $1 кг$ передается энергия ионизирующего излучения, равная $1 Дж$.

Внесистемной единицей поглощенной дозы ионизирующего излучения является *рад* ($1 рад = 100 \text{эрг/г}$, или $10^{-2} Дж/кг$).

Поглощенная доза, создаваемая в единицу времени, называется мощностью поглощенной дозы и измеряется в единицах $Гр/ч$ или его производных.

Как известно, для данного вида вещества и спектра излучения поглощенная энергия пропорциональна интенсивности (поток) излучения. Учитывая это, для характеристики интенсивности рентгеновского и γ -излучения (с энергией до $3 МэВ$) часто используют поглощенную дозу или (что для фиксированного вещества одно и то же) *ионизирующую способность в воздухе*. Такой частный случай поглощенной дозы (для γ -излучения в воздухе) принято называть *экспозиционной дозой* (X) излучения. Она выражается отношением суммарного электрического заряда ионов одного знака, образованного излучением, поглощенным в некоторой массе сухого воздуха, к этой массе.

Единицей дозы излучения является *рентген* (R). Один рентген соответствует поглощению такого количества рентгеновского или гамма-излучений, которое в $1 см^3$ сухого воздуха при температуре $0^\circ C$ и давлении

нии 760 мм рт. ст. (0,001293 г воздуха) образует ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака ($2,08340^9$ пар ионов). Энергетический эквивалент рентгена: $1R = 88 \text{ эрг}$ или $5,5 \cdot 10^7 \text{ МэВ}$ поглощенной энергии в 1 г воздуха.

Экспозиционная доза, образуемая излучением в единицу времени, называется мощностью экспозиционной дозы и выражается в рентгенах в час ($R/ч$), а также в производных единицах: миллирентгенах в час ($mR/ч$) и микролентгенах в час ($\mu R/ч$).

В ядерной геофизике единица мощности дозы $mR/ч$ широко используется для оценки интенсивности γ -излучения независимо от его спектра.

В дозиметрии при изучении влияния ионизирующих излучений на организм человека используют понятия эквивалентная доза (H).

Единицей эквивалентной дозы, введенной для оценки опасности облучения, является *Зиверт* ($Zв$), равный одному *грею*, деленному на коэффициент качества, который зависит от вида излучений (таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициенты качества Q при хроническом облучении тела человека

Вид излучения	Q
Гамма и рентгеновское	1
Бета-излучение	1
Альфа-излучение	10
Протонное	10
Нейтронное (тепловое, медленное, резонансное)	3
Нейтронное (промежуточное)	6–9
Нейтронное (быстрое)	10–7
Тяжелые ядра отдачи	20

Сравнение мощностей доз различных изотопов производят по их гамма-постоянным – K_γ .

Для оценки воздействия на среду косвенно ионизирующих излучений используют понятие «керма». Керма (K) есть отношение суммы первоначальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц, образованных под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе вещества в этом объеме. Единица кермы *грей* ($Гр$) – совпадает с единицей измерения поглощенной дозы.

4.3 Характеристики поля ионизирующих излучений

Для характеристики поля ионизирующих излучений используют следующие единицы.

Поток ионизирующих частиц – количество ионизирующих частиц, проходящее через данную площадку в единицу времени (c^{-1}).

Плотность потока ионизирующих частиц – это поток ионизирующих частиц, проходящих через элементарную площадку в единицу времени ($c^{-1} \cdot m^{-2}$).

Поток энергии ионизирующих частиц – суммарная энергия ионизирующих частиц, переносимая через данную поверхность в единицу времени (Bm).

Плотность потока энергии ионизирующих частиц – это поток энергии ионизирующих частиц, проникающих через элементарную площадку в единицу времени (Bm/m^2).

Под интенсивностью ионизирующего излучения (J) будем понимать количество энергии E (Дж), переносимое ионизирующим излучением данного вида через площадку перпендикулярную ионизирующему излучению, равную 1 см^2 , за 1 с ($c^{-1} m^{-2} \text{ Дж}^{-1}$).

Гамма-постоянная радионуклида K_γ представляет собой дозовую характеристику поля γ -излучения точечного изотропного источника при фиксированных значениях активности нуклида и расстояния до точки детектирования.

Для радия гамма-постоянной называют мощность экспозиционной дозы, создаваемой γ -излучением точечного источника при одном акте распада на расстоянии 1 м от источника. В единицах СИ гамма-постоянная радия равна $1,62 \text{ аА м}^2/(\text{кг Бк})$.

Зная гамма-постоянную радия, можно рассчитать мощность экспозиционной дозы γ -излучения на любом расстоянии от источника с массой $m \text{ г}$ радия по формуле

$$P = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \cdot K_\gamma \cdot m}{r^3},$$

где $3,7 \cdot 10^{10}$ – количество распадов в 1 г радия;

r – расстояние от источника, м .

Вопросы для самоконтроля

- 1 В каких единицах измеряется активность радионуклида в системе СИ и СГС?
- 2 Дайте определения поглощённой и экспозиционной дозы излучения.
- 3 В каких единицах измеряется экспозиционная доза в системе СИ и СГС?
- 4 В каких единицах измеряется поглощенная доза в системе СИ и СГС?
- 5 Что такое мощность дозы?
- 6 Перечислите основные характеристики поля ионизирующих излучений.

5 ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

- 5.1 Физико-химические свойства урана, радия, тория и калия.
- 5.2 Распределение радиоактивных элементов в земной коре.
- 5.3 Нарушения радиоактивного равновесия в урановых рудах.
- 5.4 Эманирование радиоактивных руд и минералов.

5.1 Физико-химические свойства урана, радия, тория и калия

Поведение радиоактивных элементов при всех геологических процессах, протекавших в земной коре, а следовательно, и их современное распределение определяются их *радиоактивными и физико-химическими свойствами*.

Влияние радиоактивных свойств проявляется в том, что из всей совокупности радиоактивных элементов на геологическую историю существования имеют только наиболее долгоживущие: *уран, торий, калий, радий*.

Рубидий и другие короткоживущие радиоактивные элементы – продукты распада урана и тория – постоянно сопровождают последние, но сами, за исключением радия и радиоактивных эманаций, заметных перераспределений за относительно короткий срок своей жизни не претерпевают.

К числу физико-химических свойств радиоактивных элементов относятся такие известные характеристики, как *относительная атомная масса*, плотность, *порядковый номер* в периодической системе элементов Менделеева, *валентность*, *химическая активность*, *растворимость соединений элементов*, их *температура плавления*, *размеры ионных (или атомных) радиусов*, *поляризуемость ионов*, *структурные особенности кристаллических решеток минералов*, *энергия этих решеток* и т. п.

Уран является наиболее тяжелым природным элементом с порядковым номером 92. Относительная атомная масса смеси изотопов его равна 238,03, плотность металлического урана – 18,9 г/см³. Уран характеризуется большим зарядом ядра и сложным строением электронной оболочки. В природных условиях он встречается в четырехвалентной U⁴⁺ и шестивалентной U⁶⁺ формах.

Основной особенностью урана является большая химическая активность и сильная восстановительная способность, особенно ярко проявля-

ющаяся в кислых водных растворах. С кислородом уран образует окислы UO_2 , U_3O_8 и UO_3 . С медью, свинцом, алюминием, железом, марганцем, висмутом, ртутью, кобальтом, цинком и бериллием уран образует интерметаллические соединения. В природных условиях соединения четырехвалентного урана имеют черный, черно-коричневый и красно-бурый цвет и характеризуют гипогенные условия образования минералов, или условия восстановительной среды. Соединения шестивалентного урана имеют яркий зеленовато-желтый цвет и относятся к области образования вторичных урановых минералов.

Радий, промежуточный продукт распада урана, характеризуется порядковым номером 88, относительной атомной массой 226,05 и плотностью 5 г/см^3 . Имеет три изотопа Ra^{223} , Ra^{224} , Ra^{226} . В чистом виде он представляет собой довольно мягкий металл серебристого цвета, разлагающий воду при обычной температуре. Химические свойства радия близки к свойствам бария, вместе с которым он часто встречается в смоляной руде. Он всегда двухвалентен. При взаимодействии с кислотами окислы и гидраты окисей радия и бария легко образуют соответствующие соли. В 1 г урана при условии радиоактивного равновесия содержится $3,4 \cdot 10^{-7}$ г радия. Существует несколько изотопов радия. Наибольшее практическое значение имеет изотоп *радий-226* с периодом полураспада 1617 лет.

В природных условиях радий встречается преимущественно в рассеянном состоянии и вследствие чрезвычайно низкого кларка (10^{-6} % по А. П. Виноградову) самостоятельных минералов, как правило, не образует.

Торий относится к группе тяжелых элементов. Его порядковый номер 90, относительная атомная масса 232,04, плотность $11,5 \text{ г/см}^3$, всегда четырехвалентен. В природных условиях торий встречается в виде окислов (торианита ($ThO_2 \cdot UO_2$), силикатов с ионами Th^{4+} , торита ($ThSiO_4$)) и в других формах. Основной особенностью природных соединений тория является весьма слабая их растворимость.

Калий. Физико-химические свойства калия резко отличны от свойств других радиоактивных элементов. Прежде всего калий распространен в природе в больших количествах. Он относится к группе щелочных металлов, имеет порядковый номер 19, относительную атомную массу 39,1 и плотность $0,86 \text{ г/см}^3$. Химически калий более активен, чем натрий. В отличие от натрия он образует со всеми известными кислотами соли, которые при выделении из растворов, как правило, не содержат кристаллизационной воды.

Из наиболее распространенных калийсодержащих минералов, обуславливающих повышенную радиоактивность горных пород, следует отме-

тит: сильвин, карналлит, калиевую селитру, микроклин, биотит, мусковит, нефелин, глауконит и др.

5.2 Распределение радиоактивных элементов в земной коре

Радиоактивные элементы в малых количествах присутствуют во всех природных веществах, составляющих земную кору, а также гидросферу, атмосферу, биосферу Земли. Поэтому горные породы и руды, с которыми приходится сталкиваться в ядерной геофизике, обладают различной естественной радиоактивностью, которая определяется содержанием в них различных радиоактивных элементов.

Радиоактивность горных пород в основном обусловлена содержанием в них элементов *уран-радиевого ряда*, *ториевого ряда* и *калия* (других элементов в горных породах намного меньше и поэтому нет практической необходимости их учитывать).

При изучении распределения радиоактивных элементов в земной коре необходимо учитывать следующие особенности:

– для радиоактивных элементов характерно состояние рассеяния в земной коре. Именно этим объясняется то, что уран и торий считаются более редкими элементами, чем, например, свинец, олово и сурьма, кларки которых имеют тот же порядок, но для них более характерно состояние концентрации, чем рассеяния;

– неравномерность их содержания в однотипных породах, особенно в магматогенных.

Еще более неравномерно распределены радиоактивные элементы по отдельным геосферам Земли.

Главная масса радиоактивных элементов сосредоточена в *магматических горных породах* (так, на их долю приходится 95 % всей массы земной коры).

Содержание радиоактивных элементов в магматических породах возрастает с увеличением содержания SiO_2 (таблица 2). Считая, что кора Земли на 2/3 состоит из кислых пород и только на 1/3 из основных и ультраосновных, А. П. Виноградов установил кларки радиоэлементов (в % от земной коры в целом). Так, например, для U – $(2-4) \cdot 10^{-4} \%$, Ra – $1,2 \cdot 10^{-10} \%$, Th – $1,2 \cdot 10^{-3} \%$.

Характерная черта геохимии (U–Ra) – неравномерность их содержаний в горных породах. Содержание радиоактивных элементов в одних и тех

же петрографических разностях (одинаковые структура, текстура, минеральный состав) значительно разнятся.

Отличительная разница содержаний (U) в одинаковых породах из разных регионов зависит от:

- различия состава магматических расплавов;
- геологических условий их формирования;
- от возраста образований.

Таблица 2 – Содержание радия, урана, тория и калия в изверженных породах

Породы	Среднее содержание, %			
	Ra, 10^{-10} %	U, 10^{-4} %	Th, 10^{-4} %	K, 10^{-1} %
Кислые	14	4,0	13,0	2,6
Средние	0 51	14	4,4	2,0
Основные	0 38	11	40	1,4
Ультраосновные	0 20	06	20	0,4

Радиоактивность *осадочных горных пород* изменяется также в больших пределах, все минералы осадочных пород по величине радиоактивности можно разбить на четыре группы:

1) минералы с низкой радиоактивностью; в группу входят основные породообразующие минералы: кварц, кальцит, доломит, ангидрит, каменная соль и др.;

2) минералы со средней радиоактивностью: железосодержащие минералы (лимонит, магнетит), отдельные акцессорные минералы (турмалин, корунд, гранат), полевые шпаты и др.;

3) минералы с повышенной радиоактивностью: к ним относятся все глинистые минералы, слюды, большая часть полевошпатовых минералов, калийные соли, апатит и сфен;

4) акцессорные минералы (монацит, циркон, ортит), радиоактивность которых более чем в 1 000 раз превышает радиоактивность минералов 1-й группы.

Наибольшим содержанием радиоактивных элементов обладают глины (особенно глубоководные), глинистые породы и калийные соли.

Радиоактивность глинистых разностей песков, песчаников, известняков и доломитов имеет промежуточные значения и закономерно изменяется с повышением содержания в них тонкодисперсного материала, а в случае карбонатных отложений – с повышением содержания терригенного материала.

Радиоактивность почв определяется радиоактивностью исходных горных пород и условиями почвообразования. Максимальной радиоактивностью характеризуются почвы, развитые на кислых магматических породах и глинах. В среднем она несколько ниже радиоактивности осадочных горных пород. Как и в случае осадочных пород, радиоактивность почв зависит от их гранулометрического состава – повышается с увеличением содержания пелитовой фракции.

Для *гидросферы* содержание радиоактивных элементов ничтожно мало. Например, концентрация радия в морских и речных водах ($n \cdot 10^{-12}$ г/л) в 1000 раз меньше, чем в изверженных горных породах. Радиоактивность разных вод колеблется в весьма широких пределах. Повышенной радиоактивностью среди пластовых вод отмечаются воды хлоркальциевого и особенно сульфиднобариевого типов (до 10^{-11} г-экв Ra/г).

Столь же низкими значениями радиоактивности характеризуется *атмосферный воздух*. Содержание в нем *радона, торона и актинона* измеряется величинами ($n \cdot 10^{-16} - n \cdot 10^{-18}$) Ки/см³. При этом наименьшее содержание радиоактивных эманаций отмечается над океанами.

Слабой радиоактивностью обладают и живые организмы. По данным К. Г. Кунашовой растения содержат радия $n \cdot 10^{-14}$ г/г, а животные – $n \cdot 10^{-18}$ г/г.

5.3 Нарушения радиоактивного равновесия в урановых рудах

В урановых рудах наблюдается нарушение радиоактивного равновесия между нуклидами уранового ряда. Оно связано с миграцией урана или продуктов его распада, а также с эманированием руд.

Миграция твердых продуктов распада урана обусловлена главным образом их химическими свойствами, а миграция радона связана с физическими процессами, определяющими движение его по капиллярам и трещинам пород.

Количественно состояние радиоактивного равновесия характеризуют *коэффициентом радиоактивного равновесия* K_{pp} , под которым понимают отношение количества данного нуклида к количеству родоначального или предшествующего ему нуклида по радиоактивному ряду, членами которого они являются. При этом количество обоих нуклидов выражают в единицах равновесного с ними родоначального нуклида.

Коэффициент радиоактивного равновесия удобно выражать в долях единицы. Если радиоактивное равновесие не нарушено, то K_{pp} равен единице.

Например: Коэффициент радиоактивного равновесия радием и ураном можно рассчитать:

$$K_{pp} = \frac{C_{Ra}}{C_U \cdot 3,4 \cdot 10^{-7}},$$

где C_{Ra} – концентрация радия в кг/кг породы;

C_U – концентрация урана в кг/кг породы;

$3,4 \cdot 10^{-7}$ – отношение C_{Ra} к C_U для равновесной породы.

Так как радий более подвижный изотоп, отношение равновесных концентраций всегда рассчитывается относительно урана.

Если $K_{pp} = 1$, то равновесие между ураном и радием не нарушено.

Если $K_{pp} > 1$, то равновесие нарушено в сторону избытка радия по сравнению с тем количеством, которое должно бы быть в равновесии с имеющимся в руде (породе) ураном.

При $K_{pp} < 1$ – равновесие нарушено в сторону недостатка радия.

Принимая концентрацию урана за единицу, можно вычислить концентрацию изотопов урана. Техника вычисления та же, что и для определения концентрации равновесного радия.

Сравнивая измеренные для урановой руды или породы концентрации различных изотопов с вычисленными значениями концентраций для равновесного ряда, можно сделать выводы о процессах, происходящих в настоящее время или происходивших в недалеком прошлом.

Различают *локальные* и *зональные* нарушения радиоактивного равновесия. При *локальных* нарушениях пространственное разделение урана и радия невелико, поэтому в небольших объемах руды наблюдаются нарушения равновесия как в сторону избытка, так и в сторону недостатка радия, которые сглаживаются для больших объемов руды. *Локальные* нарушения радиоактивного равновесия связаны главным образом с миграцией радия, а не урана. *Зональные* нарушения равновесия связаны с геохимическими зонами, которые определяются характером выноса и отложения урана. В каждой такой зоне радиоактивное равновесие нарушено главным образом в одну сторону.

Нарушение радиоактивного равновесия между нуклидами ториевого ряда в рудах наблюдается редко. Период полураспада самого долгоживущего нуклида ториевого ряда M_sTh_1 равен 6,7 года, поэтому всякое нарушение радиоактивного равновесия практически восстанавливается через 30 лет.

5.4 Эманирование радиоактивных руд и минералов

Эманирование – это процесс выделения эманации (*радона, торона* или *актинона*) из твердого вещества, содержащего изотопы радия, во внешнюю среду.

Часть эманации, образовавшейся в твердом веществе, которая при определенных условиях самопроизвольно выделяется во внешнюю среду, называют *свободной*.

В коренном залегании пород и руд под внешней средой следует понимать систему взаимосвязанных пор и трещин, по которым возможна миграция эманации.

Образовавшуюся в твердом веществе эманацию, которая при данных условиях не может выделиться из нее, называют *связанной*.

Миграция свободного радона приводит к нарушению радиоактивного равновесия между радоном и радием.

Количественными характеристиками эманирования являются:

– *эманирующая способность* – количество свободного радона, выделяемого 1 г вещества;

– *коэффициент эманирования* – это отношение эманирующей способности вещества к количеству эманации, равновесному с количеством соответствующего изотопа радия, содержащегося в 1 г вещества.

В зависимости от того, какой изотоп радона выделяется из твердого вещества, различают *эманирующую способность и коэффициент эманирования по радону, торону или актинону*.

Эманирование вещества зависит от его *физического состояния* (размера частиц, влажности, температуры и т. п.) и *от характера внешней среды*, в которую выделяется эманация. Поэтому эманирующую способность и коэффициент эманирования следует относить только к определенному физическому состоянию вещества и к определенной внешней среде.

Естественно, что эманирующая способность твердых тел зависит от наличия условий, способствующих удержанию атомов отдачи в порах и капиллярах. Эти условия определяются размерами пор и капилляров, площадью их поверхности и наличием в них среды, удерживающей атомы отдачи. Средой, удерживающей атомы эманации, может быть только вода. При этом не обязательно, чтобы она заполняла капилляры полностью. Капиллярных пленок воды вполне достаточно для удержания атомов отдачи. Дальнейший процесс выделения эманации из капилляров зависит от степени заполнения капилляров водой, от длины капилляров и в значительной мере от адсорбции атомов радона на стенках капилляров.

Если открытые капилляры полностью заполнены водой, то часть атомов радона распадается в воде за время диффузии. В основном это относится к торону и актинону.

Увлажнение проб увеличивает поверхность капилляров, покрытых водной пленкой, и приводит к увеличению эманирования. Наоборот, нагревание проб, особенно до высокой температуры, уменьшает поверхность водных пленок и вызывает уменьшение эманирования.

Измельчение проб приводит к вскрытию капилляров, ранее не имевших выхода во внешнее пространство, и к сокращению их средней длины, что вызывает увеличение коэффициента эманирования.

Эксхалация радона – это выделение радона через поверхность земли в атмосферу. Количественно эксхалацию характеризуют плотностью потока эманации через поверхность земли. Поток эманации зависит от характеристики среды, из которой она выделяется: массовой доли в ней радия, коэффициента эманирования, пористости, а также от метеорологических факторов, определяющих газообмен между почвой и атмосферой.

Эксхалация имеет более или менее одинаковые суточные и сезонные колебания, которые полностью зависят от метеорологических условий и состояния почвы. При устойчивой погоде со слабым ветром в дневные часы эксхалация отклоняется от среднего значения на 30–40 %. Увеличение скорости ветра при сухой погоде приводит к увеличению эксхалации.

В период уменьшения барометрического давления эксхалация увеличивается. Дождь вызывает сложный эффект. При небольшом дожде эксхалация увеличивается, что может быть связано с повышением эманирования и с вытеснением радона просачивающейся водой. Продолжительный дождь всегда уменьшает эксхалацию вследствие закупорки капилляров, в результате которой уменьшается эффективный коэффициент диффузии радона из почвы.

Промерзание почвы и образование снежного покрова также приводят к резкому уменьшению эксхалации. Таяние снега значительно повышает эксхалацию, вероятно, вследствие освобождения радона из-под газонепроницаемого покрова.

Температура почвы, и особенно ее колебания, влияют на эксхалацию. Ночью наблюдается максимум потока радона из почвы – в 1,5–2 раза больше среднего дневного уровня, причем этот максимум совпадает с периодом отрицательного градиента температуры в поверхностном слое почвы. Эксхалация радона является причиной присутствия его в атмосферном воздухе.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Каковы физические и химические свойства U^{238} , Th^{232} и K^{40} ?
- 2 В чем основные различия геохимических свойств урана и тория?
- 3 В какой форме изотоп калия-40 присутствует в глинистых минералах?
- 4 В породах какого генетического типа сосредоточена основная масса естественных радиоактивных элементов?
- 5 Перечислить основные концентраторы урана в осадочных породах.
- 6 Что такое эманирование?
- 7 Перечислите количественные характеристики эманирования.

6 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ

- 6.1 Взаимодействие альфа-излучения с веществом.
- 6.2 Взаимодействие бета-излучения с веществом.
- 6.3 Взаимодействие гамма-излучения с веществом.
- 6.4 Взаимодействие нейтронного излучения с веществом.

Взаимодействие атомных ядер с веществом в основном сопровождается *упругими и неупругими* соударениями с ядрами и электронами атомов среды и передачей им энергии на возбуждение и ионизацию, результатом чего является торможение самих атомных ядер. При движении в веществе атомные ядра могут захватывать и вновь терять электроны. С уменьшением скорости ядра вероятность захвата им электронов возрастает, что приводит, в конце концов, к превращению его в нейтральный атом.

6.1 Взаимодействие альфа-излучения с веществом

Как известно α -излучение – это поток ядер гелия. Траектория движения α -частицы прямолинейна. Пробег α -частицы в воздухе при нормальных условиях не превышает 9 см.

Пробег α -частиц в веществе зависит от их энергии, а также от плотности и тормозной способности вещества F .

Тормозная способность определяется потерей энергии α -частицы на единице ее пути в веществе. Величину, представляющую собой частное от

деления тормозной способности на число атомов в 1 см^3 тормозящего вещества, называют *атомной тормозной способностью* S , т. е.

$$S = \frac{F}{n},$$

где n – число атомов в 1 см^3 вещества.

Атомная тормозная способность элемента приблизительно пропорциональна корню квадратному из его атомной массы и не зависит от физико-химического состояния тормозящего атома. Поэтому пробеги α -частиц в двух различных веществах обратно пропорциональны их атомным тормозным способностям и количеству атомов в 1 см^3 вещества.

Ионизация α -частицами. Вылетающая из распадающегося ядра α -частица испытывает на своем пути многочисленные столкновения с молекулами вещества, расходуя при этом энергию на их ионизацию.

Число пар ионов, образуемое α -частицей на единице пути, называют *удельной ионизацией*.

Число пар ионов, образуемое α -частицей при полном использовании своей энергии, называют *полной ионизацией*.

Ионизирующее действие α -частиц увеличивается по мере приближения их к концу пробега, т. е. с уменьшением их скорости. Ионизация газа, вызываемая α -частицей, пропорциональна поглощенной энергии α -частиц.

6.2 Взаимодействие бета-излучения с веществом

β -излучение представляет собой поток электронов, несущих единичный заряд. β -излучение одиночного нуклида имеет непрерывный спектр энергии от 0 до некоторого максимального E_{max} , характерного для данного излучателя. Средняя энергия β -излучения разных нуклидов составляет от 0,25 до 0,45 их максимальной энергии.

Максимальный пробег β -частиц R_{max} , выраженный через поверхностную плотность вещества ρ ($\text{г}/\text{см}^2$), связан с их максимальной энергией E_{max} (МэВ) эмпирическими формулами:

$$R = \frac{0,11}{\rho} (\sqrt{1 + 22,4E_0} - 1),$$

$$0 < E_0 < 3 \text{ МэВ}.$$

При энергиях электрона свыше 1 МэВ пользуются другой формулой:

$$R = \frac{1}{\rho} (0,571E_0 - 0,161).$$

β -частицы (т. к. $m_\beta = m_e$) взаимодействуют с электронами, и отклоняются от первоначального направления, т. е. рассеиваются. Для β -частицы возможна встреча с ядрами атомов.

Вероятность взаимодействия ионизирующего излучения с веществом количественно характеризуют *эффективным сечением взаимодействия* σ .

Эффективное сечение (σ_p) рассеяния β -частицы ядром атома пропорционально Z^2 , а рассеяние электронами пропорционально Z .

Рассеяние электронов может быть упругим и неупругим.

Упругое рассеяние быстрых электронов на атомах обусловлено главным образом электрическим полем ядра. Упругим рассеянием на отдельных атомных электронах можно пренебречь из-за малости его сечения.

При *неупругом рассеянии*, напротив, рассеяние быстрого электрона на электроном атома оказывается основным процессом, обуславливающим торможение, особенно, если в результате столкновения атомный электрон покидает атом и приобретает некоторую кинетическую энергию. Эта энергия в большинстве случаев мала по сравнению с энергией падающего электрона. Заметим, что так как электроны не различаются, то нельзя сказать, какой из двух летящих после столкновения электронов был первичным, а какой вторичным (как обычно говорят, дельта-электроном). Для удобства принято считать первичным тот электрон, который после соударения обладает большей энергией.

При прохождении электрона в электрическом поле ядра атома и его электронов возникает *тормозное рентгеновское излучение*, за счет которого также теряется часть энергии быстрого электрона.

При каждом соударении с атомами вещества электрон теряет, как правило, очень небольшую часть своей энергии и только в результате многих столкновений он может потерять в веществе значительную энергию.

Возбуждение атомов вещества приводит к появлению характеристического излучения.

Непрерывное распределение по энергии и рассеяние в веществе обуславливают поглощение широкого пучка β -частиц приблизительно по экспоненциальному закону:

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} d\right),$$

где J_0 – интенсивность первоначального излучения;

μ/ρ – массовый коэффициент поглощения β -излучения, $\text{см}^2/\text{г}$;

d – поверхностная плотность вещества ($\text{г}/\text{см}^2$).

Коэффициент поглощения μ является переменным и уменьшается с увеличением E_β . Массовый коэффициент поглощения μ/ρ почти не зависит от материала поглотителя.

Проходя через газы и твердые тела, β -излучение ионизует их. Полная ионизация пропорциональна энергии электрона. Удельная ионизация обратно пропорциональна квадрату скорости электрона. На 1 см пути в воздухе электрон образует приблизительно $45/\left(\frac{v}{c}\right)^2$ пар ионов. Здесь c – скорость света; v – скорость электрона.

6.3 Взаимодействие гамма-излучения с веществом

Распространяясь в веществе, γ -кванты взаимодействуют с электронами ядрами атомов, а также с кулоновским полем, окружающим электроны и ядра атомов. Это обуславливает осуществления более десятка элементарных процессов взаимодействия γ -излучения с веществом, завершающееся *рассеянием* или поглощением γ -квантов.

Вероятность протекания каждого из этих процессов зависит от энергии γ -кванта, атомного номера Z элемента вещества и количественно характеризуют *эффективным сечением взаимодействия* σ . Под *эффективным сечением взаимодействия γ -излучения* с веществом понимают площадь поперечного сечения, условно приписываемую ядру атома, частице или системе частиц, проходя через которую, γ -квант испытывает данное взаимодействие.

В ядерной геофизике используется γ -излучение с максимальной энергией до 3 Мэв. Для такого γ -излучения характерно взаимодействие с электронами атомов. Наиболее вероятны: фотоэлектрическое поглощение (*фотоэффект*) на электронах внутренних оболочек атома; поглощение γ -кванта в процессе образования пары электрон-позитрон в кулоновском поле электронов и ядра (*эффект образования пар*); неупругое рассеяние γ -кванта на электронах (*эффект Комптона*); упругое рассеяние γ -кванта на электронах (*эффект Томсона*).

Упругое рассеяние (эффект Томсона). При *томсоновском рассеянии* (рисунок 2) энергия гамма-кванта до взаимодействия (E_γ) равняется энергии гамма-кванта после взаимодействия (E_γ'), т. е. процесс идет без потери энергии γ -кванта ($E_\gamma = E_\gamma'$).

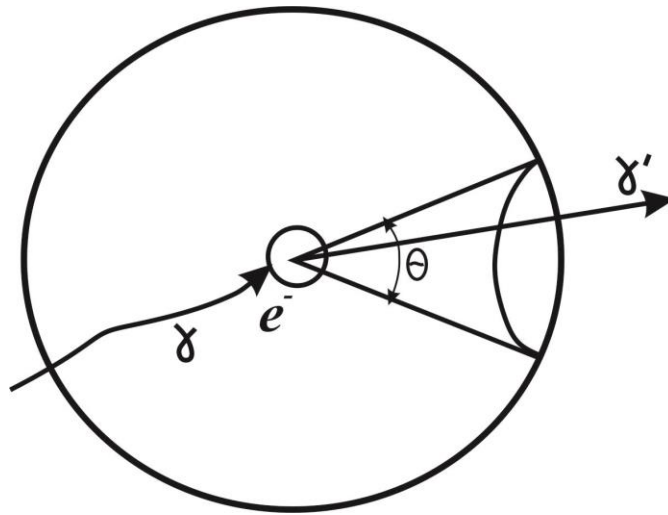


Рисунок 2 – Упругое рассеяние

Томсоновское рассеяние преобладает при $E_\gamma \ll m_e c^2$ ($m_e c^2 = 511$ Кэв, m_e – масса электрона, c – скорость света), когда энергия γ -кванта сопоставима с энергией связи электрона e_e .

Вероятность томсоновского рассеяния на электроном характеризуется эффективным сечением:

$$\sigma_T = \left(\frac{8}{3}\right) \pi r_0^2 = 0,66 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2/\text{электрон}.$$

Комптоновское рассеяние соответствует случаю неупругого рассеяния γ -кванта на свободном электроном (рисунок 3), когда в результате взаимодействия рассеянный γ -квант имеет меньшую энергию, чем первичный ($E_\gamma > E_\gamma'$). Возникает в тех случаях, когда энергия γ -квантов значительно превосходит энергию связи электрона в атоме ($E_\gamma > e_e$), в области энергий $0,05 < E_\gamma < 10$ Мэв комpton-эффект является преобладающим видом взаимодействия γ -квантов с веществом.

Разность энергий $E_\gamma - E_\gamma'$ уносится электроном, который получает кинетическую энергию P_e .

$$E_\gamma' = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m \cdot c^2} \cdot (1 + \cos\theta)}.$$

Из этого выражения следует, что максимальная энергия γ -кванта после рассеяния на электроном при $\theta = 0^\circ$, а минимальная при $\theta = 180^\circ$.

Вероятность комптоновского рассеяния на электроном характеризуется эффективным сечением σ_k .

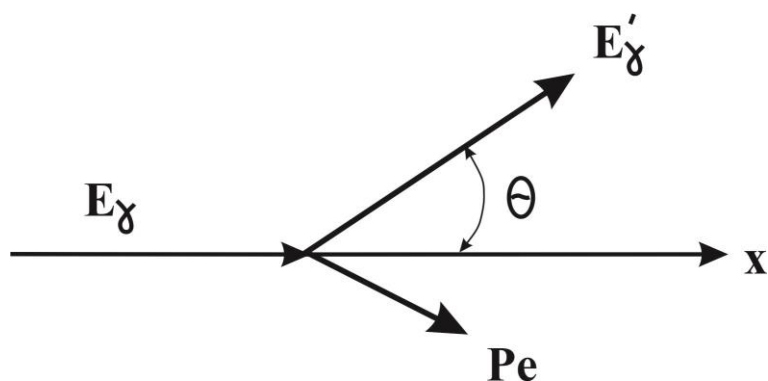


Рисунок 3 – Комптоновское рассеяние

Фотоэффект. Фотоэффектом называется такой процесс взаимодействия γ -кванта с электроном, при котором электрону передается вся энергия γ -кванта. При этом электрон выбрасывается за пределы атома (рисунок 4) с кинетической энергией $E_e = E_\gamma - I_i$, где E_γ – энергия γ -кванта; I_i – потенциал ионизации i -оболочки атома. Освободившееся в результате фотоэффекта место на электронной оболочке заполняется электронами с вышерасположенных орбит. Этот процесс сопровождается испусканием характеристического рентгеновского излучения, либо испусканием электронов Оже.

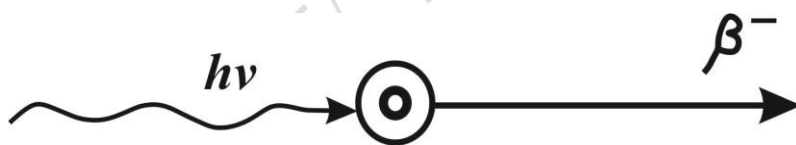


Рисунок 4 – Фотоэффект

Вероятность фотоэффекта характеризуется эффективным сечением σ_ϕ .

Чем меньше энергия связи электрона с атомом, по сравнению с энергией γ -кванта, тем менее вероятен фотоэффект. Вероятность фотоэффекта тем больше, чем меньше разность энергий потенциала ионизации i -оболочки и энергии γ -кванта. Для γ -кванта с энергией, значительно превышающей энергию связи электрона с атомом, электрон оказывается свободным и фотоэффект становится маловероятным, более вероятно комптоновское рассеяние.

Вероятность (сечение) фотоэффекта очень резко зависит от вещества (заряда Z атома), на котором происходит фотоэффект: $\sigma_\phi \approx Z^5$. Это объясняется различной энергией связи электрона в различных веществах. В легких элементах, при $Z < 25$, электроны связаны кулоновскими силами относительно слабее, чем в элементах с $Z > 50$ (тяжелые элементы).

Эффект образование пар. Процесс образования пар состоит в том, что вся энергия кванта в кулоновском поле ядра или электрона передается образующей паре электрон-позитрон (рисунок 5). Энергия покоя пары равна $2m_0c^2 = 1022 \text{ Кэв}$, совпадает с пороговой энергией γ -кванта, при которой начинается образования пар в поле ядра.

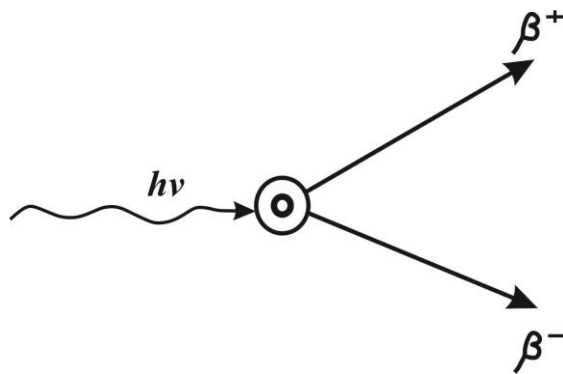


Рисунок 5 – Эффект образования пар

Поглощение γ -кванта в процессе образования пар сопровождается вторичным процессом. Возникший при поглощении γ -кванта позитрон замедляется и, соединяясь с одним из электронов среды, аннигилирует. При этом образуются два аннигиляционных γ -кванта с энергией 511 Кэв каждый, разлетающиеся в противоположные стороны. Вероятность фотоэффекта характеризуется эффективным сечением $\sigma_{\text{П}}$.

Аннигиляция (лат. *Annihilatio* – уничтожение, полное уничтожение, отмена) – реакция превращения частицы и античастицы при их столкновении в какие-либо иные частицы, отличные от исходных.

Все вышеперечисленные процессы взаимодействия γ -излучения с веществом происходят независимо друг от друга, поэтому полное эффективное сечение взаимодействия представляет собой сумму эффективных сечений фотоэффекта, комптон-эффекта, эффекта Томсона и эффекта образования пар.

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_k + \sigma_{\text{ф}} + \sigma_{\text{П}}.$$

Произведение эффективного течения отдельного процесса на число электронов (атомов) в 1 см^3 вещества называют *линейным коэффициентом ослабления γ -излучения или макроскопическим сечением*: t – для фотоэффекта, σ_s – для рассеяния при комптоновском эффекте, σ_a – для поглощения при комптоновском эффекте и k – для эффекта образования пар. Полный линейный коэффициент ослабления γ -излучения.

$$\mu = m + \sigma_s + \sigma_a + k.$$

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

Для плоскопараллельного пучка γ -квантов, испытывающих однократное взаимодействие, справедливо выражение:

$$N = N_0 \exp(-\mu x),$$

где N_0 – количество γ -квантов до взаимодействия;

N – количество γ -квантов после взаимодействия;

μ – коэффициент ослабления, характеризующий поглощающие свойства среды;

x – толщина поглотителя.

Отношение линейного коэффициента ослабления к плотности называется *массовым коэффициентом ослабления*.

Ослабление потока γ -излучения подчиняется определенным законам в зависимости от геометрии пучка: узкого или широкого. Взаимодействие с веществом узкого пучка γ -квантов приводит к уменьшению плотности потока по экспоненциальному закону:

$$J = J_0 \exp(-\mu x),$$

где J_0 и J – плотность потока γ -излучения до и после ослабления;

x – толщина слоя поглотителя.

Ослабление широкого пучка происходит по закону:

$$J = B J_0 \exp(-\mu x),$$

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

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

6.4 Взаимодействие нейтронного излучения с веществом

Нейтроны в зависимости от их энергии E условно делят на *тепловые* ($E = 0,025$ эВ), *надтепловые* ($E > 9,05$ эВ), *резонансные* ($E = 1-100$ эВ), *медленные* ($E < 1$ кэВ), *промежуточные* ($1\text{кэВ} < E < 0,5$ МэВ), *быстрые*

($E > 0,5 \text{ МэВ}$). При прохождении нейтронов через вещество (горную породу) они взаимодействуют с ядрами атомов, причем существует несколько типов элементарных процессов взаимодействия, основными из которых являются *упругое и неупругое рассеяние* и *радиационный захват нейтронов*. Эти три процесса зависят от энергии нейтронов и свойств вещества и практически полностью определяют распространение нейтронов в среде.

Упругое рассеяние характерно для быстрых нейтронов и сред с малым атомным номером. Процесс аналогичен столкновению двух упругих шаров: кинетическая энергия нейтрона после столкновения с ядром-мишенью перераспределяется обратно пропорционально их массам. Ядро при этом не возбуждается, а лишь претерпевает отдачу (ядро отдачи), нейтрон изменяет направление и скорость своего движения. Поскольку ядра отдачи являются заряженными частицами, они способны ионизировать газ или вызывать световые вспышки в сцинтилляторе и могут регистрироваться с помощью детекторов излучений.

Энергия нейтрона E после упругого взаимодействия зависит от массы ядра M и определяется выражением:

$$E = E_0 \frac{M^2 + 2M \cos \alpha + 1}{(M + 1)^2},$$

где E_0 – энергия падающего нейтрона;

α – угол отклонения нейтрона от первоначального направления.

При $\alpha = 180^\circ$ (лобовое соударение):

$$E = E_0 \left(\frac{M - 1}{M + 1} \right)^2.$$

Анализ этой формулы показывает, что при лобовом соударении нейтрона с ядром водорода, имеющим массу $M = 1$, возможна полная потеря его энергии. Поэтому водородосодержащие среды (вода, парафин) являются хорошими замедлителями нейтронов.

Неупругое рассеяние происходит при взаимодействии быстрых нейтронов с ядрами тяжелых элементов. В этом случае нейтрон теряет значительную долю своей энергии на возбуждение ядра, т. е. увеличение его внутренней энергии. Возвращаясь в основное состояние, возбужденное ядро испускает один или несколько γ -квантов, спектр энергии которых характерен для данного рассеивающего элемента. Энергия рассеянных нейтронов примерно равна разности энергий первичного нейтрона

и испускаемого γ -кванта. Неупругое рассеяние имеет порог, равный энергии первого уровня возбуждения ядра, которая для легких ядер составляет 2–4 МэВ и уменьшается с увеличением массы последних до 0,6–1 МэВ. Радиационный захват нейтронов наблюдается преимущественно при взаимодействии тепловых и медленных нейтронов с любыми средами.

В области малых энергий вероятность захвата обратно пропорциональна скорости нейтронов. Захват нейтронов сопровождается испусканием одного или нескольких γ -квантов.

Таким образом, нейтроны, попавшие в горную породу, в течение короткого промежутка времени ($\sim 10^{-5}$ с) замедляются в результате упругого и иногда неупругого взаимодействий с ядрами. В результате замедления большая их часть приобретает энергию характерную для тепловых нейтронов, и захватывается ядрами.

Распределение нейтронов в горных породах, т. е. плотность нейтронов на различных расстояниях от источника, определяется энергией нейтронов, мощностью источника и так называемыми нейтронными свойствами или параметрами среды, среди которых интерес представляет следующие.

Параметр замедления, или средняя логарифмическая потеря энергии на один акт упругого рассеяния

$$\xi = \ln E_0 - \ln E.$$

Длина замедления нейтронов:

$$L_3 = \sqrt{\frac{r^2}{6}},$$

где r^2 – среднее значение квадрата расстояния между источником быстрых нейтронов и точкой замедления их до тепловых.

Среднее время жизни (τ_T) тепловых нейтронов:

$$\tau_T = \frac{L_3}{v},$$

где L_3 – путь нейтронов по ломаной линии от точки замедления до точки поглощения;

v – скорость движения тепловых нейтронов ($v = 2,2 \cdot 10^6$ см/с при $T = 20$ °С).

Длина диффузии (L_D) характеризует среднее квадратичное расстояние, проходимое нейтроном от точки замедления до точки поглощения:

$$L_D = \sqrt{D \cdot \tau_T},$$

где D – коэффициент диффузии тепловых нейтронов, аналогичный коэффициенту диффузии молекул в газе.

Параметры L_3 и L_D зависят главным образом от содержания водорода в горных породах, а τ_T – от концентрации элементов с высокой поглощающей способностью тепловых нейтронов (B , C , Cd и т. д.). Это позволяет использовать нейтронные методы для определения физического состояния и элементного состава горных пород и руд. В природе нет источников, распадающихся с испусканием нейтронов. Естественное нейтронное излучение, возникающее в результате спонтанного деления ядер U , характеризуется весьма низким потоком нейтронов, поэтому при работе методами ядерной геофизики являются облучаемые ядра стабильных элементов, которым тем или иным способом сообщают энергию, достаточную для вырывания нейтрона из ядра.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Дайте определение эффективному сечению взаимодействия.
- 2 Приведите классификацию нейтронов по энергиям.
- 3 Как зависит тип взаимодействия нейтронов с веществом от энергии нейтронов? Чем отличается рентгеновское излучение от гамма-излучения?
- 4 Чем отличается комптоновское рассеяние гамма-квантов от томсоновского? Какой вид рассеяния будет преобладать при взаимодействии мягкого рентгеновского излучения с веществом?
- 5 Какой тип взаимодействия гамма-кванта с веществом преобладает при энергии гамма-кванта: а) до 300 Кэв; б) свыше 1 Мэв?
- 6 Используя какое взаимодействие нейтронов с веществом, можно проводить поэлементный анализ вещества?
- 7 Почему водород является аномальным замедлителем нейтронов?
- 8 Назовите основные характеристики взаимодействия нейтронов с веществом.

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:
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ**

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 404.

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

