Ядерная геофизика.

Ядерная геофизика –

одно из направлений геофизики, занимающееся изучением геологического строения земной коры на основе исследований естественных радиоактивных процессов, происходящих в недрах Земли.

Ядерная геофизика объединяет

1. методы исследования горных пород и руд по их естественной радиоактивности (**радиометрия или радиометрическая разведка**)
2. методы изучения вызванной, т.е. после предварительного облучения, радиоактивности с целью определения состава или различных физических свойств пород и руд (**ядерно-физические методы**).

Основными методами **радиометрии** являются

1) гамма-съемка (ГС), предназначенная для изучения интенсивности гамма-излучения,
2) эманационная съемка (ЭС), при которой по естественному альфа-излучению почвенного воздуха определяют концентрацию в нем радиоактивного газа - радона.

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.

К **ядерной геофизике** относится так называемый геокосмический метод, основанный на подземной регистрации космических мюонов.

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.).

Задачи:

1) Изучение распространения радиоактивных элементов и стабильных изотопов в Земле, влияние этого распространения на геологическую историю Земли и вопросы определения абсолютного возраста горных пород, а также изучение процессов, ведущих к концентрации радиоактивных элементов в различных зонах земной коры (ЗК) и к формированию их промышленных месторождений.
2) Исследование геологического строения ЗК, основанного на испускании радиоактивного излучения и на изучении ядерных свойств элементов.

Общие сведения о радиоактивности

Естественная радиоактивностью - самопроизвольный распад неустойчивых атомных ядер, спонтанно превращающихся в ядра других элементов и сопровождающийся испусканием альфа-, бета-частиц, гамма-квантов и другими процессами.

1896 г. - А. **Беккерель** - открытие явления радиоактивности - обнаружил испускание ураном неизвестного вида проникающего излучения, названного им радиоактивным.
1898 г. - супруги **М. Кюри и П. Кюри** открыли два новых радиоактивных элемента - **полоний** и **радий**.
1899 г. - Э. **Резерфорд** – установлено наличие 3 видов излучения радиоактивных элементов - a-, b- и *γ*-лучей - и выявлена их природа.

Известно более 230 радиоактивных изотопов различных элементов, называемых радиоактивными нуклидами (радионуклидами).

Радиоактивность тяжелых металлов с порядковым номером в таблице Менделеева, большим 82, сводится к последовательным превращениям одних элементов в другие и заканчивается образованием устойчивых нерадиоактивных изотопов.

Основными радиоактивными рядами или семействами тяжелых элементов являются ряды урана-238, урана-235, тория-232.

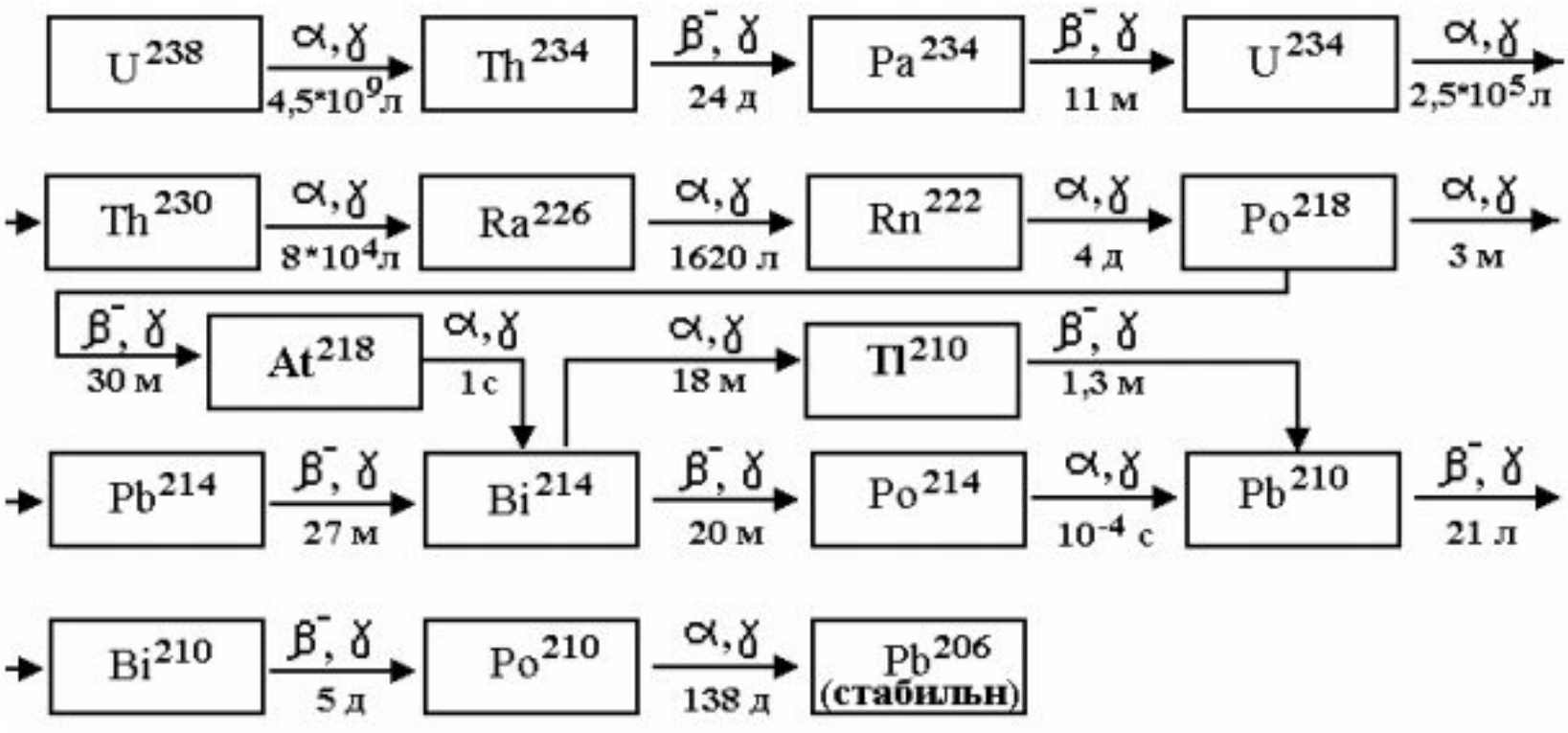

Схема радиоактивных превращений семейства урана.

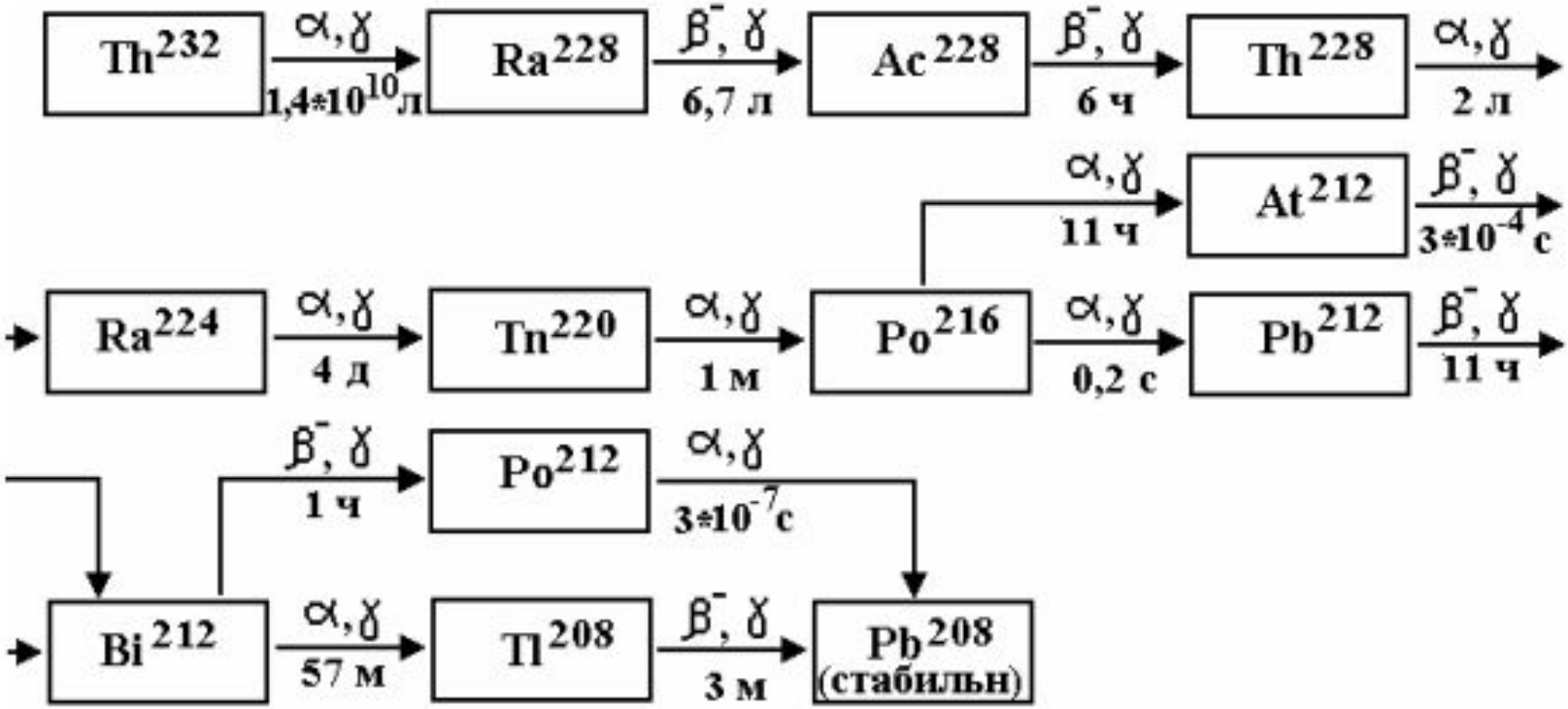

Схема радиоактивных превращений семейства тория.

Одиночные радионуклиды, в которых радиоактивный распад ограничивается одним актом превращений:

Радиоактивные элементы, не входящие в ряды				
Изотоп	Продукт превращения	Содержание изотопа, %	T, годы	Тип распада
K^{40}	Ca^{40}	0.0119	$1.3*10^{9}$	К-захват, β^-
Rb^{87}	Sr^{87}	27.8	$5*10^{10}$	β^-
Zr^{98}	Nb^{98}	2.8	$6.2*10^{16}$	β^-
In^{115}	Sn^{115}	95.8	$6*10^{14}$	β^-
Te^{130}	I^{130}	34.1	$1.4*10^{21}$	β^-
La^{138}	Ba^{138}	0.089	$7*10^{10}$	К-захват
Sm^{147}	Nd^{143}	15.1	$6.7*10^{11}$	α

Параметры радиоактивности

1. *Период полураспада*.

Период полураспада ($T_{1/2}$), который у различных элементов изменяется в очень широких пределах - от 10^{-6} до 10^{10} лет.
Для каждого элемента он является определенной и постоянной величиной и может служить его диагностическим признаком.

Закон радиоактивного распада - описывает зависимость радиоактивного распада от времени и количества радиоактивных атомов в данном образце

$$N = N_0 * e^{-\lambda T}$$

Для практического использования **закон радиоактивного распада** можно записать так :

$$N = N_0 * 2^{-t/T}$$

λ— постоянная распада, которая характеризует вероятность радиоактивного распада за единицу времени и имеющая размерность $с^{-1}$

$\mathbf{N_o}$ – начальное число радиоактивных ядер,

$\mathbf{N}$ – число радиоактивных ядер спустя время **t**,

$\mathbf{T = T_{1/2}}$ – период полураспада – время за которое распадается половина радиоактивных ядер.

2. *Состав естественных излучений*.
Естественная радиоактивность состоит из альфа-, бета-, гамма-, нейтронных и других излучений.

Альфа-излучение представляет собой поток положительно заряженных частиц (ядер атомов гелия), энергия которых на длине пути около 10 см в воздухе и долей миллиметров в породе тратится на ионизацию и нагревание окружающей среды, поэтому проникающая способность у них очень мала.

Бета-излучение представляет собой поток электронов и позитронов, энергия которых тратится на ионизацию и возбуждение атомов окружающей среды. В результате они рассеиваются (это приводит к ослаблению их интенсивности) и поглощаются (теряют свою энергию) на длине пути, в 100 раз большей, чем альфа-излучение.

Гамма-кванты представляют собой поток электромагнитного излучения очень высокой частоты (10^{18} Гц). Хотя они также рассеиваются и поглощаются окружающей средой, но благодаря своей электрической нейтральности отличаются еще более высокой проникающей способностью (сотни метров в воздухе и до метра в горных породах).

Радиоактивный распад может сопровождаться **захватом некоторыми ядрами электронов** из собственных оболочек атомов (*K* и *L*-захват) с возникновением мягкого и рентгеновского гамма-излучений, спонтанными излучениями ядер нейтронов и другими процессами.

К излучениям, широко используемым в ядерной геофизике, относится **нейтронное излучение**.

Оно возникает при ядерных реакциях (например, в смеси полония и бериллия) или создается с помощью управляемых генераторов нейтронов, циклотронов и др.

Из всех видов излучений нейтронное обладает **наибольшей проникающей** способностью. Однако нейтроны замедляются в процессе рассеяния, а затем поглощаются средой, т.е. захватываются ядрами атомов за время от микросекунд до миллисекунд.
В свою очередь, захват сопровождается мгновенным испусканием гамма-квантов и других частиц.

3. *Количество, концентрация, доза и мощность дозы гамма-излучения*.

Количество и концентрация долгоживущих элементов урана, тория, калия (U, Th, K-40) в горной породе определяются их процентным содержанием.

Абсолютной единицей радиоактивности в системе СИ является **беккерель** (1 Бк = 1 расп./с).

Иногда используют внесистемную единицу **грамм-экв.** Ra (количество вещества, гамма-излучение которого эквивалентно излучению 1 г радия).

Единицей **удельной радиоактивности** в СИ служит беккерель на единицу массы или объема.

За **единицу экспозиционной** дозы облучения в СИ принят кулон на килограмм (Кл/кг) и внесистемная единица - рентген (1Р = $2,58*10^{-4}$ Кл/кг).

Мощность дозы, т.е. облучение за единицу времени, в радиометрии выражают в амперах на килограмм (А/кг) и микрорентгенах в час (мкР/ч).

4. *Энергия излучений*.
Важной характеристикой излучений является энергия, которая представляет собой начальную кинетическую энергию частиц и измеряется в **электрон-вольтах** (эВ).

Максимальные значения для альфа-, бета-, гамма-излучений равны миллионам электрон-вольт (10; 4; 3 МэВ соответственно).
Нейтроны по энергии разделяют на
холодные (0,001 эВ),
тепловые (0,025 эВ),
надтепловые (> 0,05 эВ),
резонансные (0,5 - 100 эВ),
медленные (< 1 кэВ),
промежуточные (1 кэВ - 0,5 МэВ),
быстрые (> 0,5 МэВ).

Взаимодействие ионизационных излучений с окружающей средой.

Альфа- и бета-частицы вызывают в основном ионизацию окружающей среды, т.е. образование положительных ионов и свободных электронов вследствие вырывания электронов из внешних оболочек атомов.

При прохождении **гамма-квантов** через вещество разного химического состава наблюдаются следующие ядерные процессы:

1. Фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект), происходящее при взаимодействии гамма-квантов малых энергий (мягкое гамма-излучение с энергией меньше 0,5 МэВ) с атомами плотного вещества.

В результате из атомов выбиваются электроны, а среда ионизируется.

Атом, потерявший электрон, оказывается в возбужденном состоянии и способен заполнять освободившийся уровень одним из электронов внешней оболочки. Это сопровождается испусканием кванта характеристического (рентгеновского) излучения.

В целом поглощение гамма-квантов на единице длины пути пробега можно выразить через коэффициент поглощения ($\mu_ф$), называемый также **макроскопическим сечением фотоэффекта**.

2. Комптоновское взаимодействие (рассеяние) гамма-квантов повышенных энергий (> 0,5 МэВ) наблюдается с атомами легкого вещества.

В результате гамма-квант передает часть энергии электрону, отклоняется от своей прямолинейной траектории распространения и происходит так называемое неупругое рассеяние, сопровождающееся поглощением. Его можно охарактеризовать **коэффициентом поглощения** $\mu_к$, или **макроскопическим сечением комптоновского взаимодействия**.

3. **Образование электронно-позитронных пар** происходит при взаимодействии гамма-квантов высоких энергий (> 1 МэВ) с полем ядра атомов.
При этом гамма-квант отдает энергию и поглощается. Коэффициент такого поглощения ($\mu_{эп}$) называется **макроскопическим сечением образования пар**.

Существуют и другие взаимодействия гамма-квантов (фотонейтронный эффект, релеевское рассеяние на связанных электронах атомов и др.).
В целом за счет основных эффектов взаимодействия полный линейный коэффициент поглощения гамма-квантов в породе, содержащей и легкие, и тяжелые элементы, можно описать формулой

$$\mu_\gamma = \mu_ф + \mu_к + \mu_{эп}$$

μ_γ - полное макроскопическое сечение взаимодействия гамма-лучей с веществом

Нейтронное излучение характеризуется следующими основными реакциями с ядрами элементов окружающей среды:

1. Неупругим рассеянием быстрых нейтронов на ядрах тяжелых элементов, приводящим к их возбуждению. При переходе ядра в основное первоначальное состояние оно излучает гамма-квант.
2. Упругим рассеянием быстрых нейтронов на ядрах легких элементов, приводящим к передаче энергии нейтронов ядрам, а в результате к их замедлению, уменьшению скорости тем большему, чем меньше массовые числа среды. Замедленные до тепловой энергии нейтроны поглощаются ядрами, т.е. происходит их радиационный захват с испусканием гамма-квантов. В результате наблюдается наведенная вторичная радиоактивность.

Таким образом, быстрые нейтроны вследствие разнообразных взаимодействий с ядрами элементов окружающей среды рассеиваются, замедляются до тепловых энергий средой.

Количественно происходящие при этом процессы принято описывать полным коэффициентом рассеяния и поглощения ($\mu_п$), называемым также суммарным макроскопическим нейтронным сечением за счет рассеяния ($\sigma_р$) и поглощения ($\sigma_п$), т.е.

$$\mu_п = \sigma_р + \sigma_п .$$

Величина, обратная полному сечению, называется средней длиной пробега нейтронов при наличии рассеяния ($1/\sigma_р$) и поглощения ($1/\sigma_п$).

Радиоактивность горных пород и руд

Радиоактивность горных пород и руд тем выше, чем больше концентрация в них естественных радиоактивных элементов семейств урана, тория, а также калия-40.

Радиоактивность минералов.

По радиоактивности (радиологическим свойствам) породообразующие минералы подразделяют на четыре группы.

1. Наибольшей радиоактивностью отличаются минералы урана (первичные - уранит, настуран, вторичные - карбонаты, фосфаты, сульфаты уранила и др.), тория (торианит, торит, монацит и др.), а также находящиеся в рассеянном состоянии элементы семейства урана, тория и др.

2. Высокой радиоактивностью характеризуются широко распространенные минералы, содержащие калий-40 (полевые шпаты, калийные соли).

3. Средней радиоактивностью отличаются такие минералы, как магнетит, лимонит, сульфиды и др.

4. Низкой радиоактивностью обладают кварц, кальцит, гипс, каменная соль и др.

В этой классификации радиоактивность соседних групп возрастает примерно на порядок.

Радиоактивность горных пород, руд и вод.

Радиоактивность горных пород определяется прежде всего **радиоактивностью породообразующих минералов**. В зависимости от качественного и количественного состава минералов, условий образования, возраста и степени метаморфизма их радиоактивность изменяется в очень широких пределах.

Радиоактивность пород и руд по эквивалентному процентному содержанию урана принято подразделять на следующие группы:

- породы практически нерадиоактивные ($U<10^{-5}$ %);
- породы средней радиоактивности ($U< 10^{-4}$ %);
- высокорадиоактивные породы ($U< 10^{-3}$ %);
- бедные радиоактивные руды ($U< 10^{-2}$ %);
- рядовые и богатые радиоактивные руды ($U>0,1$ %).

С радиоактивностью горных пород тесно связана радиоактивность природных вод и газов.
В целом в гидросфере и атмосфере содержание радиоактивных элементов ничтожно мало.

Подземные воды могут иметь разную радиоактивность. Особенно велика она у подземных вод радиоактивных месторождений и вод сульфидно-бариевого и хлоридно-кальциевого типов.

Радиоактивность почвенного воздуха зависит от количества эманаций таких радиоактивных газов, как радон, торон, актинон. Ее принято выражать коэффициентом эманирования пород (Сэ).

Коэффициент эманирования пород - отношение количества выделившихся в породу долгоживущих эманаций (в основном радона с наибольшим $T_{1/2}$) к общему количеству эманаций.

В массивных породах Сэ = 5 - 10%, в рыхлых трещиноватых Сэ = 40 - 50 %, т.е. Сэ увеличивается с ростом коэффициента диффузии.

Важной характеристикой радиоактивности сред является **энергетический спектр излучения** или интервал распределения энергии.

Энергия альфа-, бета- и гамма-излучения каждого радиоактивного элемента либо постоянна, либо заключена в определенном спектре.

В частности, по наиболее жесткому и проникающему гамма-излучению каждый радиоактивный элемент характеризуется определенным энергетическим спектром.

Например, для урано-радиевого ряда максимальная энергия гамма-излучения не превышает 1,76 МэВ, а суммарный спектр 0,65 МэВ, для ториевого ряда аналогичные параметры составляют 2,62 и 1 МэВ. Энергия гамма-излучения калия-40 постоянна (1,46 МэВ).

Ядерно-физические свойства горных пород

Общая характеристика ядерно-физических свойств

Под ядерно-физическими (гамма- и нейтронными) свойствами горных пород понимают их способность по-разному рассеивать, замедлять и поглощать гамма-кванты или нейтроны разных энергий.

Эти свойства вытекают из рассмотренных выше физических явлений, сопровождающих взаимодействие гамма-квантов с электронами и ядрами атомов (фотоэлектрическое поглощение, комптоновское взаимодействие, образование электронно-позитронных пар и др.) или нейтронов с ядрами атомов (неупругое и упругое рассеяние и поглощение, сопровождающееся захватом тепловых нейтронов ядрами атомов и вторичным гамма-излучением).

Вероятность того или иного взаимодействия зависит

- от энергии гамма-квантов или нейтронов,
- от пути проходящего излучения в горной породе
- ядерно-физических свойств горной породы.

Основными из этих свойств являются микро- или макроскопические сечения взаимодействия гамма-квантов и нейтронов с отдельными или всеми атомами изучаемой горной породы.

Гамма-лучевые свойства горных пород

Основным гамма-лучевым свойством породы является ее способность поглощать и рассеивать гамма-лучи. Количественно это свойство описывается полным линейным коэффициентом ослабления и поглощения μ_γ или суммарным (полным) макроскопическим сечением взаимодействия гамма-лучей с единицей объема горной породы. Для узкого пучка гамма-квантов его определяют с помощью следующих уравнений:

$$\mu_\gamma = \sum_{i=1}^{k} \sigma_{\gamma i} N_i, \quad I_\gamma = I_{\gamma 0}\, e^{-\mu_\gamma L},$$

где $\sigma_{\gamma i}$ - микроскопическое сечение взаимодействия атома *i*-го химического элемента с гамма-квантом при общем количестве атомов этого элемента в единице объема *Ni* и общем числе элементов k ; I_γ, $I_{\gamma 0}$ - интенсивность гамма-излучения в конце и начале поглощающего слоя толщиной L.

Практически определяют эффективный коэффициент ослабления $\mu_{\gamma эф}$ по экспериментально полученной эффективной интенсивности гамма-излучения:

$$I_{\gamma\,эф} = I_{\gamma\,0} \cdot e^{-\mu_{\gamma эф} L}.$$

Макроскопическое сечение взаимодействия или эффективный линейный коэффициент ослабления зависит от порядковых номеров в периодической системе Менделеева и массовых чисел химических элементов горной породы, а также ее плотности σ. На изменении этих свойств основаны методы изучения химического состава и плотности горных пород по интенсивности рассеянного гамма-излучения ($I_{\gamma\gamma} = I_{\gamma 0}$).

При этом комптоновское рассеяние зависит от плотности, а фотоэффект - от химического состава и концентраций химических элементов.

Нейтронные свойства горных пород

Основным нейтронным свойством горных пород и сред является их способность поглощать и рассеивать нейтроны.

Количественно это свойство описывается <u>полным линейным коэффициентом ослабления и поглощения или суммарным (полным) макроскопическим взаимодействием</u> нейтронов с единицей объема горной породы. Величина $\mu_п$ определяется микроскопическими сечениями рассеяния и поглощения нейтронов атомами или ядрами ($\sigma_{пi}$) всех составляющих ее химических элементов от $i = 1$ до $i = k$ с числом атомов i-го элемента в единице объема N_i по формуле:

$$\mu_n = \sum_{i=1}^{k} \sigma_{ni} N_i, \quad I_n = I_{n0} e^{-\mu_n L},$$

где I_n, I_{n0} — плотность(или интенсивность) нейтронов в конце и начале слоя толщиной L.

Нейтронное микроскопическое сечение ядра σ_{ni} равно его эффективной площади, которая обычно больше его геометрического сечения.

Нейтронное сечение измеряют в единицах площади (10^{-28} м^2).

Наибольшими нейтронными сечениями обладают редкоземельные элементы (например, для кадмий ($2{,}25 \cdot 10^{-25}$м^2), бор($0{,}769 \cdot 10^{-25}$м^2), ртуть($0{,}38 \cdot 10^{-25}$м^2) и др.

У большинства элементов микроскопическое сечение ядра изменяется в пределах$(0{,}1—100) \cdot 10^{-25}$м^2.

Средняя длина замедления нейтронов L3 определяется способностью ядер рас-сеивать нейтроны и равна расстоянию, на котором энергия нейтронов уменьшается от исходной (у быстрых нейтронов энергия превышает 0,5 МэВ) до тепловой(0,025 эВ).

Наименьшей длиной замедления (L_3< 10 см) обладают минералы, в которых имеются бериллий, углерод, железо и водородсодержащие породы, насыщенные водой, нефтью или газом.
В других породах, особенно содержащих тяжелые химические элементы L_3 составляет десятки сантиметров.