### 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,
- 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 а-, b- и *у*-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.

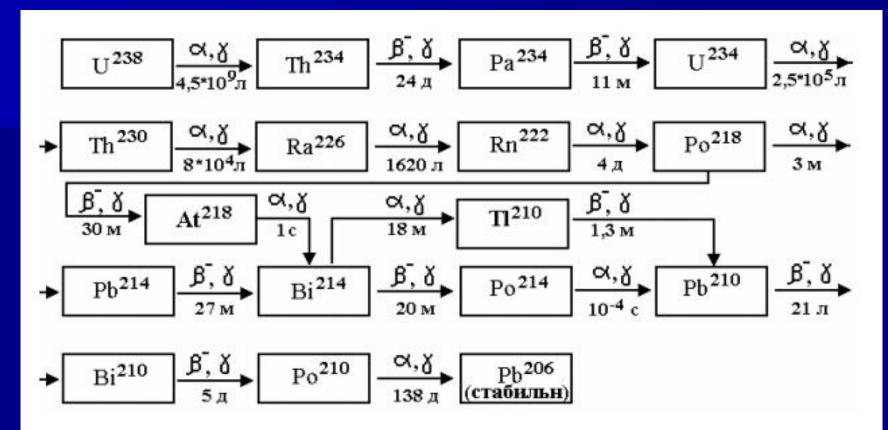


Схема радиоактивных превращений семейства урана.

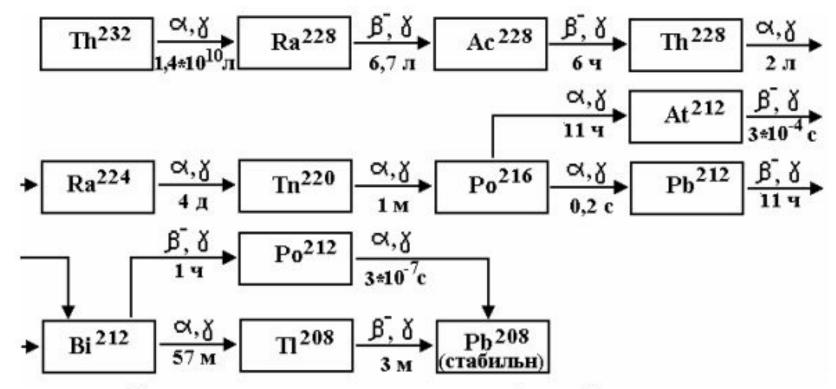


Схема радиоактивных превращений семейства тория.

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

Изотоп	Продукт превращения	Содержание изотопа, %	Т, годы	Тип распада
$K^{40}$	превращения Са <sup>40</sup>	0.0119	1.3*109	К-захват, β
Rb <sup>87</sup>	Sr <sup>87</sup>	27.8	5*10 <sup>10</sup>	β
$Zr^{98}$	Nb <sup>98</sup>	2.8	6.2*10 <sup>16</sup>	β-
In <sup>115</sup>	Sn <sup>115</sup>	95.8	6*10 <sup>14</sup>	β-
Te <sup>130</sup>	I <sup>130</sup>	34.1	1.4*10 <sup>21</sup>	β-
La <sup>138</sup>	Ba <sup>138</sup>	0.089	7*10 <sup>10</sup>	К-захват
Sm <sup>147</sup>	Nd <sup>143</sup>	15.1	6.7*10 <sup>11</sup>	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 :

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

 $\lambda$ — постоянная распада, которая характеризует вероятность радиоактивного распада за единицу времени и имеющая размерность  $c^{-1}$   $N_o$  — начальное число радиоактивных ядер,  $N_o$  — число радиоактивных ядер спустя время t,  $T = T_{1/2}$  — 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  $(1P = 2,58*10^{-4} \text{ Кл/кг})$ .

**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 ( $\mu_{\phi}$ ), 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  $\mu_{\kappa}$ , 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 (µ<sub>эп</sub>) 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

 $\mu_{\gamma} = \mu_{\phi} + \mu_{\kappa} + \mu_{\Theta}$  на 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 ( $\mu_{\Pi}$ ), называемым также суммарным макроскопическим нейтронным сечением за счет рассеяния ( $\sigma_{p}$ ) и поглощения ( $\sigma_{\Pi}$ ), т.е.

$$\mu_n = \sigma_p + \sigma_n$$
 .

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

#### 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<sup>-5</sup> %);
- породы средней радиоактивности (U< 10<sup>-4</sup> %);
- высокорадиоактивные породы (U< 10<sup>-3</sup> %);
- бедные радиоактивные руды (U< 10<sup>-2</sup> %);
- 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 С $\mathfrak{S} = 5 - 10\%$ , в рыхлых трещиноватых С $\mathfrak{S} = 40 - 50\%$ , т.е. С $\mathfrak{S}$  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 гаммаизлучению каждый радиоактивный элемент характеризуется определенным энергетическим спектром.

Например, для <u>урано-радиевого ряда</u> максимальная энергия гамма-излучения не превышает 1,76 МэВ, а суммарный спектр 0,65 МэВ, для <u>ториевого ряда</u> аналогичные параметры составляют 2,62 и 1 МэВ. Энергия гамма-излучения <u>калия-40</u> 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 поразному 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 римпи суммарным (полным) макроскопическим сечением взаимодействия гамма-лучей с единицей объема горной породы. Для узкого пучка гамма-квантов его определяют с помощью следующих уравнений:

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

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;  $I_{\gamma}$ ,  $I_{\gamma 0}$  - интенсивность гамма-излучения в конце и начале поглощающего слоя толщиной L.

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

$$I_{\gamma \circ \phi} = I_{\gamma \circ 0} \cdot e^{-\mu_{\gamma \circ \phi} L}.$$

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 гаммаизлучения  $(I_{vv} = I_{v0})$ . 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 полным линейным коэффициентом ослабления и поглощения или суммарным (полным) макроскопическим взаимодействием нейтронов с единицей объема горной породы. Величина  $\mu_n$  определяется микроскопическими сечениями рассеяния и поглощения нейтронов атомами или ядрами ( $\sigma_{ni}$ ) 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<sub>ni</sub> равно его эффективной площади, которая обычно больше его геометрического сечения.

Нейтронное сечение измеряют в единицах площади ( $10^{-28}$  м<sup>2</sup>).

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

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

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.