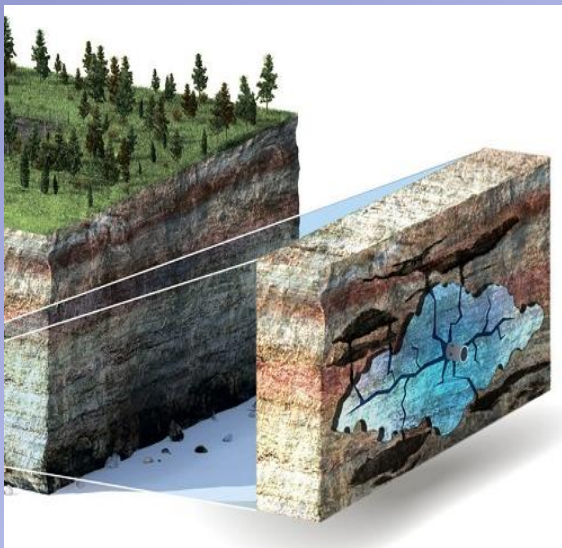


**НАО «КАРАГАНДИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АБЫЛКАСА САГИНОВА»**

**Кафедра «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых»**



# **ЛЕКЦИЯ**

**Тема: РАДИОАКТИВНОСТЬ  
НЕФТЕГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ПЛАСТОВ**

**Дисциплина: Петрофизика  
нефтяного пласта**



**Автор:**

**к.т.н., доц. Пономарева М.В.**

**Образовательная программа:**

**7М07201 «Геофизические методы поисков  
и разведки МПИ»**



# План лекции

---

1. Типы радиоактивных распадов
2. Естественная радиоактивность горных пород
3. Радиоактивность жидкой фазы
4. Взаимодействие  $\gamma$ -квантов с горными породами
5. Нейтронная активность горных пород



## Цель лекции

---

*Цель лекции* – рассмотреть типы радиоактивных распадов, изучить природу естественной радиоактивности горных пород и жидкой фазы, рассмотреть особенности взаимодействия с горными породами гамма-излучения и нейтронной активности горных пород.



## Роль и место темы лекции в дисциплине, связь с другими дисциплинами

---

Дисциплина «Петрофизика нефтяного пласта» дает понятие об основных физических и физико-химических свойствах пластов-коллекторов, связей петрофизических величин между собой и с геофизическими параметрами, методики определения того или иного петрофизического свойства нефтяных пластов.

Эти знания необходимы для углубленного изучения природы естественной радиоактивности горных пород и жидкой фазы, особенностей взаимодействия с горными породами гамма-излучения и нейтронной активности горных пород.

Исследования с помощью различных ядерных излучений проводятся при разведке и разработке месторождений нефти, газа и других полезных ископаемых. Они позволяют определить тип и границы пород, залегающих на разных глубинах, находить продуктивные пласты, а так же получать характеристики пластов: плотность и проницаемость породы, насыщенность порового пространства нефтью, водой или газом, положение ВНК и ГНК и т.д. **Поэтому изучение радиоактивности горных пород является весьма важной и актуальной задачей.**

Знания полученные при изучении материалов данной лекции используются при изучении таких дисциплин как «Интерпретация промыслово-геофизических исследований», «Спецкурс эксплуатации нефтегазовых месторождений», при прохождении профессиональных практик и написании магистерской диссертации.



## Типы радиоактивных распадов

---

Наличие в горных породах радиоактивных элементов, а так же особенности прохождения через них радиоактивных излучений обуславливают радиометрические и ядерно-геофизические методы их изучения.

**Радиоактивность** – свойство некоторых веществ к самопроизвольному превращению, которое сопровождается радиоактивным излучением.

При **естественной** радиоактивности происходит **самопроизвольное** превращение одних атомных ядер в другие или изотопы этих же ядер. Этот процесс также сопровождается **выделением энергии и возникновением новых радиоактивных элементов**. Ядра последних снова распадаются, и так продолжается до тех пор, пока не образуется устойчивый изотоп.



## Типы радиоактивных распадов

---

Радиоактивность является **внутренним свойством ядер**, не зависит от внешних условий и определяется соотношением ядерных сил. Ядерные силы носят объемный характер: между протонами и нейтронами в ядре происходит обмен мезонами. Они являются короткодействующими с радиусом действия порядка  $10^{-15}$  м.

**В горных породах имеются как устойчивые, так и неустойчивые элементы.**

Энергия нуклонов в ядре рассчитывается по формуле:

$$E = \Delta m \cdot c^2, \quad (1)$$

где  $\Delta m$  – дефект массы,  $c$  – скорость света в вакууме.

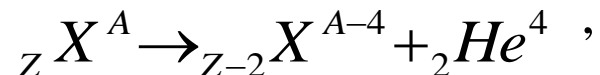


# Типы радиоактивных распадов

Чем сложнее ядро, тем больше в нем протонов и нейтронов, и тем меньше энергия связи, приходящаяся на один нуклон. **Поэтому радиоактивность – это свойство преимущественно тяжелых элементов.** Все элементы, начиная с таллия (порядковый номер  $Z=81$ ), являются радиоактивными или содержат радиоактивные изотопы.

Самопроизвольное превращение атомных ядер сопровождается испусканием альфа- и бета-частиц и гамма-излучением.

**1. Альфа-распад** заключается в испускании ядром  $\alpha$ -частицы ( ${}_2\text{He}^4$ ) и образованием ядер новых элементов по схеме:



где  $X$  - элемент с атомной массой  $A$  и порядковым номером  $Z$ .

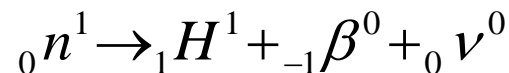


## Типы радиоактивных распадов

---

**2. Бета-распад**, при котором в ядре происходят превращения по двум вариантам:

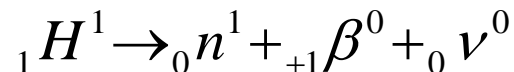
а) Превращение в ядре нейтрона в протон с испусканием  $\beta$ -частицы (электрона) по схеме:



с образованием электрона и нейтрино.

б) Превращение в ядре протона в нейтрон (захват ядром орбитального электрона с внутреннего  $k$ -слоя) по схеме:

с образованием позитрона.







## Типы радиоактивных распадов

---

**3. Гамма-излучение** – жесткое электромагнитное излучение, которое сопровождается ядерными превращениями. Энергия  $\gamma$ -излучения индивидуальна для каждого вида ядер и является параметром конкретного ядерного превращения.

Для  $\gamma$ -излучения более характерны корпускулярные свойства, чем волновые, то есть его можно представить в виде потока частиц, летящих со скоростью света, массой

$$m = \hbar \cdot \nu ,$$

Где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота излучения.



## Типы радиоактивных распадов

---

$\gamma$ -лучи обладают значительно большей проникающей способностью по сравнению с  $\alpha$ - и  $\beta$ - частицами, поэтому именно они используются в разведочной геофизике.

Единицей измерения радиоактивности является – величина, определяющая число распадов в радиоактивном элементе породы в единицу времени.

Так же единицей измерения радиоактивности является **беккерель** ( $\text{Бк} = \text{с}^{-1} = \text{расп/с}$ ).

Используют: **удельную массовую активность – Бк/кг, удельную объемную активность – Бк/м<sup>3</sup> и поверхностную активность – Бк/м<sup>2</sup>.**



## Закон радиоактивного распада

---

Радиоактивный распад отдельного ядра – носит вероятностно-статистический характер, поэтому время его распада предсказать невозможно. Но для большого числа атомов проявляется определенная закономерность, которая выражается **законом радиоактивного распада**:

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

где  $N$  и  $N_0$  – текущее и начальное количество атомов превращающегося элемента,  $t$  – время с начала превращения,  $\lambda$  – параметр распада, характеризующий вероятность распада за единицу времени. Время, за которое распадается половина атомов, называется периодом полураспада:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$



## Закон радиоактивного распада

---

В таблице 1 приведены значения периодов полураспада некоторых изотопов, чаще всего встречающихся в горных породах.

Изотоп	Содержание в земной коре, (не более) %	Период полураспада, лет
${}_{92}\text{U}^{238}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$4,49 \cdot 10^9$
${}_{90}\text{Th}^{232}$	$11,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{10}$
${}_{19}\text{K}^{40}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^9$ ( $\beta$ ) или $1,24 \cdot 10^{10}$ ( $\gamma$ )



## Закон радиоактивного распада

---

Всего в горных породах присутствуют более 50 радиоактивных изотопов с разной степенью радиоактивностью. В целом радиоактивность горных пород зависит от содержания в ней трех элементов: **урана, тория, калия**.

Кроме радиоактивных элементов семейств урана, актиния и тория, в природе радиоактивными являются изотопы калия, кальция, рубидия, циркония, индия, олова, теллура, лантана, неодима, самария, лютеция, вольфрама, рения и висмута. Эти изотопы являются долгоживущими – их период полураспада превышает  $10^9$  лет.

Радиоактивные изотопы составляют незначительную часть литосферы – до глубины 16 км их содержание в % (массовых) составляет: урана  $U^{235} - 2 \cdot 10^{-6}$ ,  $U^{238} - 3 \cdot 10^{-4}$ , тория  $Th^{232} - 8 \cdot 10^{-4}$ , радия  $Ra^{226} - 0 \cdot 10^{-10}$ , актиния  $Ac^{227} - 6 \cdot 10^{-14}$ , калия  $K^{40} - 3 \cdot 10^{-4}$ , кальция  $Ca^{48} - 6,4 \cdot 10^{-3}$  и рубидия  $Rb^{87} - 8,4 \cdot 10^{-3}$ .



## Закон радиоактивного распада

---

Для определения содержания радиоактивных элементов в горных породах введено понятие **кларка радиоактивности** – содержание радиоактивного элемента в исследуемой породе по отношению к его содержанию в земной коре:

$$кл = \frac{X_{э.н.}}{X_3} \cdot 100\%$$

В настоящее время за оптимальные кларки приняты:

$${}_{92}\text{U}^{238} - 2,1 \cdot 10^{-40}\%, \quad {}_{90}\text{Th}^{232} - 7,0 \cdot 10^{-40}\%, \quad {}_{19}\text{K}^{40} - 1,83 \cdot 10^{-40}\%.$$

Приведенные значения не окончательны, так как мало изучена радиоактивность пород ложа океанов.



## Закон радиоактивного распада

---

Радиоактивные элементы в горных породах присутствуют в составе более чем 200 минералов. Особенно много встречается минералов с ураном.

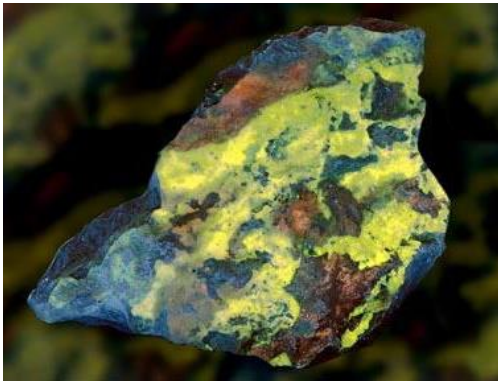
Учитывая распространенность радиоактивных изотопов в горных породах и интенсивность их распада, можно сказать, что **наибольшее влияние** на них могут оказывать **U** и **Th** с продуктами их распада, калий  $^{40}\text{K}$  и отчасти рубидий  $^{87}\text{Rb}$ .

Остальные радиоактивные элементы из-за их малой распространенности и большого периода полураспада характеризуются незначительной суммарной энергией распада и не могут играть существенной роли в создании радиоактивности гонных пород.

# Закон радиоактивного распада

Наиболее распространенные минералы горных пород по их радиоактивности подразделяются на **четыре основные группы**:

- **слаборадиоактивные**: кварц, калиевые полевые шпаты, плагиоклаз, кальцит, доломит, ангидрит, каменная соль, нефелин;
- **с нормальной** или слабоповышенной радиоактивностью: биотит, амфиболы, пироксены и др;
- **с повышенной** радиоактивностью: апатит, эвдиалит, флюорит, ильменит, магнетит и др;
- **высокоррадиоактивные**: сфен, ортит, монацит, циркон, лопарит и др.



Урановые руды





## Классификация пород по степени радиоактивности

---

Радиоактивность **осадочных пород** связана с наличием в их составе калийных, собственно урановых и ториевых, уран- и торийсодержащих минералов, а также адсорбированных радиоактивных элементов. Содержание тория в этих породах изменяется от  $49 \cdot 10^{-6}$  до  $3500 \cdot 10^{-6}$  кг/кг, а урана- от  $12,7 \cdot 10^{-6}$  до  $119 \cdot 10^{-6}$  кг/кг.

В **песчаниках** и **алевролитах** радиоактивные элементы чаще всего находятся в глинистой части этих пород, в адсорбированном виде и в песчаниках с органическими примесями. Песчаники и алевролиты содержат в среднем микроколичества U, Th и немного калия. Высоким содержанием U, Th и K обладают **глины**.

Относительно высокая радиоактивность глин и глинистых сланцев объясняется повышенной сорбцией урана, радия, тория и калия на глинистых частицах.



## Классификация пород по степени радиоактивности

---

Повышенную радиоактивность глин и глинистых пород объясняют также относительно высоким содержанием в этих породах калия (до 6,5%), который находится здесь не только в минеральной, но и в сорбированной форме. Значительная адсорбция ионов урана возможна **из природных вод**, где он присутствует в виде легко растворимых карбонатных и других соединений, например,  $\text{Na}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ .

**Морские осадки** имеют **более** высокую радиоактивность по сравнению с **речными** и **лиманными**.

Концентрация радия в них приблизительно в 3 раза превышает концентрацию радия в метаморфических и осадочных породах континентов.



## Радиоактивность жидкой и газовой фаз

---

Концентрация урана в **морских водах** и атмосферных осадках не превышает  $10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>.

В **подземной гидросфере** содержание урана может быть выше. Водорастворимые соли грунтовых вод в целом богаче ураном, чем минеральный остаток пластовых вод.

При этом по сравнению с усредненным содержанием урана в горных породах сухой остаток грунтовых вод в среднем богаче ураном, а в пластовых водах – беднее.

# Радиоактивность жидкой и газовой фаз

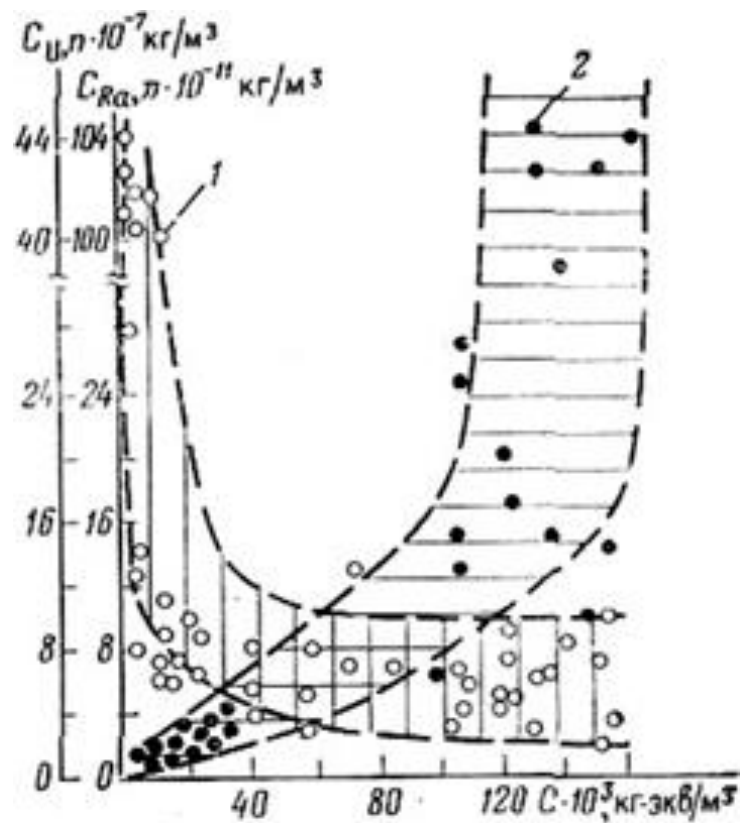


Рисунок 1 – Зависимость содержания U и Ra от минерализации подземных вод: 1 – Ra, 2 – U



## Радиоактивность жидкой и газовой фаз

---

Вблизи земной поверхности концентрация  $U$  в водах изменяется от  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup> и более. Фоновое содержание  $U$  (в безрудных породах), достигающее  $10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup>, установлено в водах до глубины в сотни метров.

На глубинах, концентрация урана нигде не превышает  $10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>, причем с глубиной максимальное содержание  $U$  в водах имеет тенденцию к убыванию (рисунок 2). Обычно глубинные воды лишены урана.

*Содержание  $U$  в многочисленных образцах нефтей различных типов не превышает  $(10^{-7}-10^{-6})\%$ .*



## Радиоактивность жидкой и газовой фаз

---

Лишь некоторые тяжелые нефти смолисто-асфальтенового состава в ряде случаев имеют повышенные количества урана. Уран концентрируется в нефти, в основном, в асфальтенонах и смолах, содержание которых возрастает со степенью окисления нефти из-за инфильтрации вод (в том числе поверхностных), содержащих окисляющие реагенты.

Поэтому с глубиной концентрация урана в нефти сначала снижается, а затем становится приблизительно постоянной (рисунок 3).

Содержание урана в нефти увеличивается с ростом ее сернистости, плотности и смолистости. Вклад в радиоактивность пород жидкой и газовой фаз сравнительно невелик.

# Радиоактивность жидкой и газовой фаз

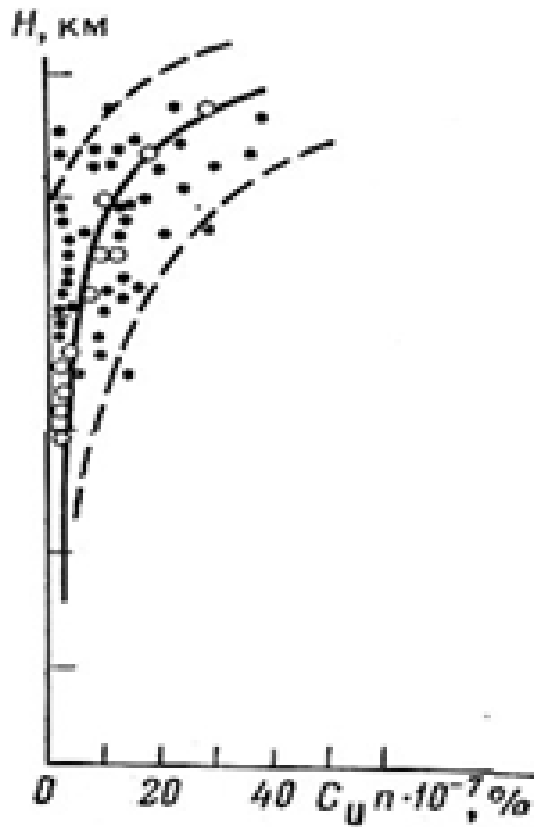


Рисунок 2 – Зависимость концентрации урана в водах от глубины

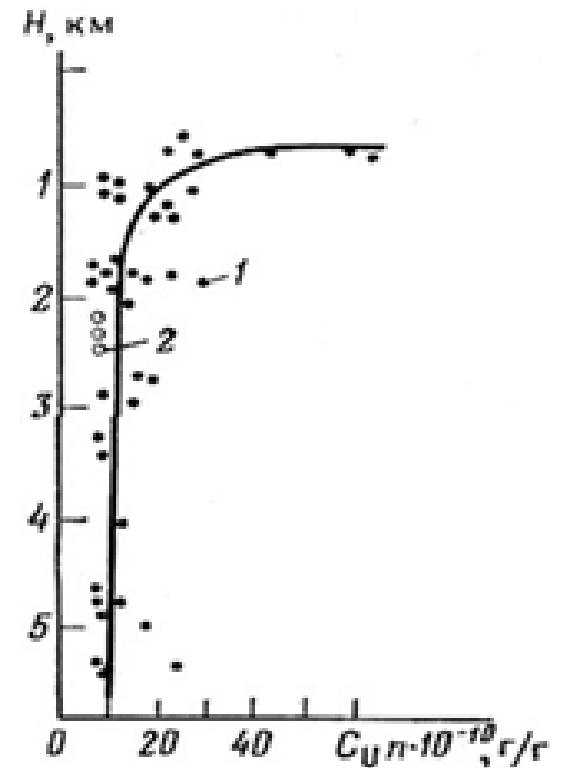


Рисунок 3 – Зависимость концентрации урана в нефти от глубины



## Взаимодействие $\gamma$ -квантов с горными породами

---

Проникающая способность  $\gamma$ -квантов значительно больше проникающей способности  $\beta$ -частиц, потому что  $\gamma$ -частица не несет зарядов (нет взаимодействия с электрическим полем других заряженных частиц) и ее масса меньше, чем у  $\alpha$  и  $\beta$  частиц.

Гамма-излучение ослабляется в породах из-за:

- внутренней конверсии (для некоторых радиоактивных элементов),
- фотоэффекта;
- комптоновского эффекта,
- образования пар.

При **внутренней конверсии**, характерной для пород, содержащих тяжелые ядра,  $\gamma$ -кванты поглощаются электронной оболочкой того же атома с излучением электронов.





# Взаимодействие $\gamma$ -квантов с горными породами

---

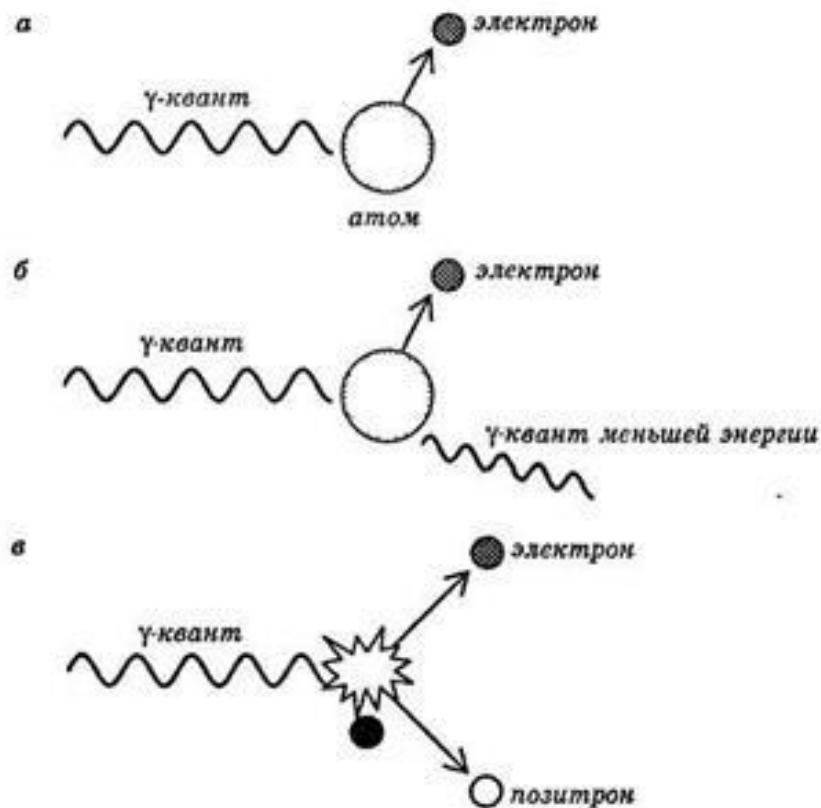
Ослабление  $\gamma$ -излучения в веществе породы приближенно (в широком пучке) описывается формулой:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$I, I_0$  – интенсивность исходного  $\gamma$ -излучения и после прохождения слоя породы толщиной  $x$ ;

$\mu$  – суммарный коэффициент ослабления, состоящий из коэффициентов ослабления  $\gamma$ -излучения, учитывающих фотоэффект, комптоновский эффект и процесс образования пар.

# Взаимодействие $\gamma$ -квантов с горными породами



Взаимодействие гамма-излучения с веществом  
**а** – фотоэффект; **б** – комптоновское рассеяние;  
**в** – образование электрон-позитронной пары



# Взаимодействие $\gamma$ -квантов с горными породами

**а) фотоэффект** –  $\gamma$ -лучи взаимодействуют с электронной оболочкой атома. Возникающий фотоэлектрон уносит часть энергии  $\gamma$ -излучения. Жесткое  $\gamma$ -излучение создает фотоэлектроны. Мягкое  $\gamma$ -излучение – вторичное  $\beta$ -излучение;

**б) комптоновский эффект** –  $\gamma$ -излучение взаимодействует с электроном, передавая ему часть энергии, и затем распространяется в горной породе; при энергиях  $\gamma$ -квантов 0,2–3,0 МэВ;

**в) образование электрон-позитронных пар** возникает при облучении жесткими  $\gamma$ -квантами с энергией не менее 1,02 МэВ; наиболее вероятен для пород, содержащих тяжелые атомы (например, свинец).



## Нейтронная активность горных пород

---

**Нейтроны** – это частицы с периодом полураспада 1000 с, распадающиеся на протон, электрон и антинейтрино с выделением энергии 0,78 МэВ.

Нейтроны легко проникают в ядра и взаимодействуют с ними.

*По энергии нейтроны разделяют на:*

- **быстрые** (с энергией  $E=2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^7$  эВ),
- **промежуточные** (0,5– $2 \cdot 10^5$  эВ),
- **резонансные** (100 эВ),
- **медленные** (0,5 эВ),
- **надтепловыми** (0,3–0,5 до  $10^2$  эВ),
- **тепловые** (0,025 эВ),
- **холодные** (0,001 эВ).



## Нейтронная активность горных пород

---

Энергетическим группам нейтронов соответствуют определенная скорость и другие характеристики.

Нейтроны рассеиваются и поглощаются в среде, заполняющей скважину, в обсадной колонне, цементе и породах.

Рассеиваясь, нейтроны теряют энергию, переходят постепенно в тепловое состояние с энергией порядка 0,025 эВ и скоростями распространения 2200 м/с, а затем за время, исчисляемое долями миллисекунды, захватываются одним из ядер химических элементов.

В процессе рассеяния изменяются направления движения, нейтронов при столкновении их с ядрами элементов среды, и кинетическая энергия нейтронов уменьшается.



# Нейтронная активность горных пород

---

Различают упругое и неупругое рассеяние нейтронов.

**Упругое рассеяние.** При этом кинетическая энергия системы нейтрон–ядро неизменна до и после акта рассеяния. Однако если до рассеяния, в лабораторной системе координат, носителем кинетической энергии системы являлся нейтрон (ядро считается неподвижным), то после рассеяния кинетическая энергия перераспределяется между нейтроном и ядром отдачи в соответствии с их массами и углом рассеяния.

**Неупругое рассеяние.** При неупругом рассеянии ядро, захватившее, а затем потерявшее нейтрон, остается в возбужденном состоянии. Возвращаясь в основное, оно испускает  $\gamma$ -квант. Такая реакция наиболее вероятна в породах с тяжелыми элементами при энергиях нейтронов от нескольких килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт. При неупругом рассеянии нейтроны после нескольких соударений далее рассеиваются упруго.



# Нейтронная активность горных пород

---

В результате как упругого, так и неупругого рассеяния нейтроны теряют энергию, и их скорость уменьшается.

**Поглощение.** При некоторых ядерных реакциях происходит поглощение, а иногда и размножение нейтронов. На первой стадии ядерных реакций образуются составные ядра из первоначального ядра и захваченного нейтрона. В этих ядрах между нуклонами перераспределяется кинетическая энергия, внесенная нейтроном.

Особенности взаимодействия с горными породами гамма – излучения и нейтронной активности горных пород широко используется при применении методов радиоактивного и нейтронного каротажа в геофизике. Исследования с помощью различных ядерных излучений проводятся при разведке и разработке месторождений нефти, газа и других полезных ископаемых.

Они позволяют определить тип и границы пород, залегающих на разных глубинах, находить продуктивные пласты, а также получать характеристики пластов – плотность и проницаемость породы, насыщенность порового пространства нефтью, водой или газом, положение ВНК и ГНК.



## Практическое использование

**Гамма – каротаж (ГК)** – измерение естественной радиоактивности самих горных пород. Для этого в скважину опускается прибор с детектором  $\gamma$  – лучей: разрядный счетчик или фотоумножитель с кристаллом. В последнем случае можно судить не только об общей интенсивности, но и об энергетическом спектре естественного излучения.

**Гамма – гамма каротаж (ГГК)** – в этом случае в скважину вместе с индикатором  $\gamma$  – излучения опускается  $\gamma$  – источник, между которыми помещается свинцовый фильтр. Это дает возможность оценить, насколько сильно  $\gamma$  – лучи рассеиваются и поглощаются в породе. Источниками излучения служат *Ra*, *Co* и др. Свинцовый фильтр препятствует прямому попаданию  $\gamma$  – лучей из источника в индикатор. Рассеяние и поглощение  $\gamma$  – лучей слабо связаны с индивидуальными свойствами ядер, они определяются, в основном плотностью среды, поэтому диаграммы ГГК расчленяют разрез залежи по плотности пород.





## Практическое использование

---

**Нейтронный каротаж (НК)** – дает более разнообразную информацию о ядерных свойствах горных пород, поскольку процессы взаимодействия нейтронов с веществом в гораздо большей степени отражают индивидуальные свойства ядер. При этом в скважину опускается источник быстрых нейтронов (типа  $Ra+Be$  или  $Po+Be$ ), а на некотором расстоянии – индикатор нейтронного (**нейтрон-нейтронный каротаж ННК**) или  $\gamma$  – излучения (**нейтронный  $\gamma$  – каротаж НГК**).

В обоих случаях скорость счета индикатора сильнее всего зависит от замедляющей способности среды, а именно от содержания водорода в породе. Так как водород в горной породе содержится в основном в жидкости (нефти и воде), заполняющей поровое пространство, то показания приборов ННК и НГК связаны монотонной зависимостью с величиной пористости пласта.



## Практическое использование

---

Возможность различать нефть и воду в поровом пространстве, несмотря на их практически одинаковые замедляющие свойства, обусловлена наличием солей в подземных водах при практически полном отсутствии их в нефти. Показания приборов против водонасыщенных участков при НГК выше, чем против нефтяных (число  $\gamma$ -квантов, испускаемых ядрами породы при захвате нейтронов), а при ННК – выше (оценивается по величине плотности тепловых нейтронов).

Важнейшей особенностью всех методов является возможность обследования разреза горных пород через стальную колонну и затрубный цемент, благодаря большой проникающей способности как нейтронного, так и  $\gamma$ -излучения.



# Контрольные вопросы

---

1. Какие существуют типы радиоактивных распадов?
2. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
3. Что называется периодом полураспада?
4. Что является единицей измерения радиоактивности?
5. Какие радиоактивные элементы наиболее часто встречаются в горных породах?
6. Что такое кларк радиоактивности?
7. За счет каких процессов  $\gamma$ -излучение ослабляется в горных породах?
8. Какие существуют виды взаимодействия гамма-квантов с веществом?
9. Какие существуют виды взаимодействия нейтронов с веществом?
10. Какие существуют методы каротажа, основанные на взаимодействии гамма-излучения с горными породами и их нейтронной активности?



## Рекомендуемая литература

---

1. Мухаметова З.С., Физика нефтяного и газового пласта. Электронный учебно-методический комплекс, 2-ое издание, переработанное, Уфа, 2013.
2. Физика пласта: Учебное пособие / Авт.-сост. Т.Б. Кочина, В.Н. Спиридонова, Н.Н. Родионцев, И.А. Круглов. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2017.
3. Мирзажданзаде А.Х., Аметов И.М., Ковалев А.Г. Физика нефтяного и газового пласта. М., Недра, 2012.
4. Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. М., Недра, 2012.
5. Ковалева Л.А. Физика нефтегазового пласта. – Учебное пособие. Уфа, РИО БашГУ, 2013.
6. Воронина Н.В., Чупров В.В. Лабораторный практикум по дисциплине Физика пласта, Ухта: УГТУ, 2017.
7. Ермилов О.М. и др. Физика пласта, добыча и подземное хранение газа. М., Недра, 2012.
8. Технология добычи нефти и газа. Лабораторный и расчетный практикум для студентов специальности 185 «Нефтегазовая инженерия и технологии»/В.Г. Топоров, С.Ф. Поверенный, Е.П. Варавина, Е.А. Яцкевич. – Х.: НТУ «ХПИ», 2018.