

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

Физический факультет

Кафедра общей ядерной физики

Курсовая работа

Взаимодействие нейтронов с веществом, нейтронный гамма-каротаж.



Выполнил  
студент 2 курса группы 212  
Милованов Н.Ю.

Научный руководитель  
аспирант Федоров Н.А.

Москва 2020

## Оглавление

1 Введение.....	3
2 Взаимодействия нейтронов с веществом.....	4
2.1 Классификация нейтронов по энергиям.....	4
2.2 Упругое рассеяние нейтронов.....	5
2.3 Неупругое рассеяние нейтронов.....	7
2.4 Радиационный захват нейтронов.....	7
2.5 Реакции с образованием протонов.....	7
2.6 Реакции с образованием $\alpha$ – частиц.....	8
2.7 Реакции деления.....	8
2.8 Реакции с образованием двух или более нуклонов.....	9
2.9 Вероятности нейтрон-ядерных реакций.....	9
3 Нейтронный гамма-каротаж.....	11
3.1 Основы нейтронного гамма-каротажа.....	11
3.2 Преимущества и недостатки в сравнении с другими методами каротажа.....	13
3.3 Основные типы детекторов гамма-квантов и источников нейтронов при использовании нейтронного гамма-каротажа.....	14
4 Моделирование нейтронного гамма-каротажа в Geant4.....	18
5 Заключение.....	35
Благодарности.....	37
Список литературы.....	38

## 1 Введение

Нейтрон является нейтральной частицей, относящейся к классу барионов. Благодаря своим уникальным характеристикам он нашел широкое применение как в фундаментальной, так и в прикладной физике. Несмотря на то, что открытие нейтрона Джеймсом Чедвиком произошло в 1932 году, поле для исследования этой частицы огромно. Перед современной нейтронной физикой стоят такие задачи, как исследование возможности существования тетранейтронов и иных связанных состояний из одних лишь нейтронов, поиск возможных нейтрон-антинейтронных осцилляций, а также изучение свойств сильно нейтронно-избыточных легких ядер. Наличие у нейтронов магнитного дипольного момента позволило использовать их для изучения магнитной структуры вещества. С помощью дифракции нейтронных волн определяют структуру кристаллических веществ. В ядерной энергетике для получения энергии используют цепную ядерную реакцию деления ядер  $\text{Pu}^{239}$  или  $\text{U}^{235}$ . Ядра делятся при попадании в них нейтронов, при этом получаются новые нейтроны и осколки деления, которые обладают большой кинетической энергией. В результате столкновений осколков с другими атомами эта кинетическая энергия быстро преобразуется в тепло. Отсутствие у нейтронов электрического заряда позволяет ему проникать в глубокие слои вещества, что нашло свое применение в геофизике. Проходя сквозь вещество, нейтроны вызывают различные ядерные реакции. На некоторых видах этих взаимодействий основан метод геофизических исследований под названием нейтронный гамма-каротаж. Он был впервые проведен в США в 1941 году, и с тех пор активно используется при изучении скважин по всему миру. Стоит отметить, что на практике нейтронный гамма-каротаж применяется совместно с другими методами исследования скважин (различные методы электрического, акустического каротажей). Таким образом, удастся достичь наибольшей точности в прогнозировании состава исследуемых пластов. С момента

своего изобретения нейтронный каротаж стал неотъемлемой частью геофизических исследований, так как он позволяет по наличию в исследуемом веществе водорода обнаруживать такие важные в современном мире ресурсы как вода и нефть.

## 2 Взаимодействия нейтронов с веществом

В нейтронной физике главным образом используются нейтроны с энергиями в диапазоне от  $10^{-7}$  эВ до десятков МэВ.

Вычислим характерные длины волн де Бройля вблизи границ этого диапазона, чтобы оценить размеры структур, которые можно исследовать с помощью облучения нейтронами:

$$\lambda_1 = \frac{h}{p_1} = \frac{2\pi\hbar c}{\sqrt{2mc^2 E_1}} \approx \frac{1240 \text{ МэВ}\cdot\text{Фм}}{\sqrt{2\cdot 938,57 \text{ МэВ}\cdot 10^{-13}\cdot\text{МэВ}}} \approx 10^{-5} \text{ см}$$

$$\lambda_2 = \frac{h}{p_2} = \frac{2\pi\hbar c}{\sqrt{2mc^2 E_2}} \approx \frac{1240 \text{ МэВ}\cdot\text{Фм}}{\sqrt{2\cdot 938,57 \text{ МэВ}\cdot 10\cdot\text{МэВ}}} \approx 10^{-12} \text{ см}$$

Из полученного результата следует, что с помощью рассеяния и дифракции нейтронов можно исследовать объекты размером от  $10^{-12}$  см (атомные ядра) до  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$  см (молекулы, видимые в оптический микроскоп).

### 2.1 Классификация нейтронов по энергиям

Ввиду того, что электрический заряд нейтрона равен нулю, он практически не взаимодействует с электронами вещества, в которое он проникает. Это чисто ядерный процесс. Вероятность взаимодействия нейтронов с веществом в различных ядерных реакциях во многом зависит как от массового и зарядового числа ядра-мишени, так и непосредственно от энергии нейтронов.

Принято разделять нейтроны на следующие группы по энергиям (стоит понимать, что между ними нет жесткой границы)

- медленные:  $< 1$  эВ;
- резонансные:  $1$  эВ –  $10$  кэВ;
- промежуточные:  $10$  кэВ –  $1$  МэВ;

- быстрые: 1 МэВ – 100 МэВ;
- релятивистские: > 100 МэВ

## 2.2 Упругое рассеяние нейтронов

В результате упругого рассеяния ядро не возбуждается, суммарная кинетическая энергия нейтрона и ядра сохраняются. Упругое рассеяние является важным механизмом замедления быстрых нейтронов.

Рассмотрим потерю энергии нейтрона при столкновении с ядром-мишенью.

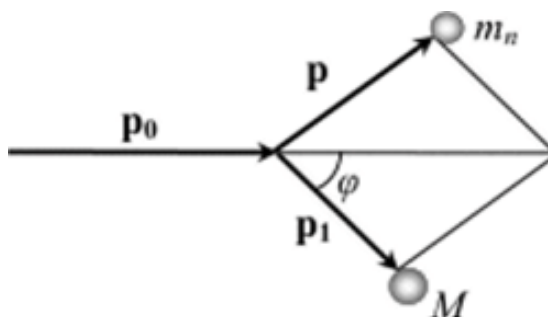


Рис. 1: Упругое рассеяние нейтрона

Так как  $m_n \approx m_p$

В силу закона сохранения энергии:

$$E_0 = E + E_1, \quad (1)$$

где  $E_0$  и  $E$  – кинетическая энергия нейтрона до и после рассеяния,  $E_1$  – кинетическая энергия ядра отдачи (замедлителя).

В силу закона сохранения импульса:

$$\vec{p}_0 = \vec{p} + \vec{p}_1 \quad (2.1)$$

Или же в скалярной форме:

$$p^2 = p_0^2 + p_1^2 - 2p_0p_1\cos\varphi, \quad (2.2)$$

где  $\varphi$  – угол, под которым движется ядро отдачи по отношению к начальному направлению движения нейтрона (см. Рис.1).

Перепишем соотношение (2.2) в следующем виде:

$$2m_nE = 2m_nE_0 + 2ME_1 - 4\sqrt{m_nME_0E_1}\cos\varphi \quad (2.3)$$

Заменяем массы нейтрона и замедлителя их массовыми числами:

$$E = E_0 + AE_1 - 2\sqrt{AE_0E_1} \cos\varphi \quad (2.4)$$

Исключая  $E$  из последнего равенства с помощью (1):

$$E_1(A + 1) = 2\sqrt{AE_0E_1} \cos\varphi$$

Отсюда кинетическая энергия ядра отдачи и рассеянного нейтрона:

$$E_1 = E_0 \frac{4A}{(A+1)^2} \cos^2\varphi,$$

$$E = E_0 \left(1 - \frac{4A}{(A+1)^2} \cos^2\varphi\right)$$

Найдем среднюю энергию рассеяния нейтрона  $\langle E \rangle$ , усреднив  $\cos^2\varphi$ :

$$\langle E \rangle = E_0 \left(1 - \frac{4A}{(A+1)^2} \langle \cos^2\varphi \rangle\right) \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \langle \cos^2\varphi \rangle &= \frac{1}{2\pi-0} \cdot \int_0^{2\pi} \cos^2\varphi \, d\varphi = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{2} \cdot \int_0^{2\pi} (1 + \cos 2\varphi) \, d\varphi = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2\pi + \\ &+ \left(\frac{-\sin 4\pi}{2} + \frac{\sin 0}{2}\right) = \frac{1}{2} \quad (2.6) \end{aligned}$$

Подставим (2.5) в (2.6):

$$\langle E \rangle = E_0 \left(1 - \frac{2A}{(A+1)^2}\right) \quad (2.7)$$

Из уравнения (2.7) можно сделать вывод о том, что наибольшие потери энергии нейтрон претерпевает на легких ядрах (чем меньше  $A$ , тем больше потери). Таким образом, наибольшие потери энергии будут наблюдаться при упругом рассеянии нейтронов на ядрах водорода. А именно:

$$\langle E \rangle = E_0 \left(1 - \frac{2 \cdot 1}{(1+1)^2}\right) = \frac{E_0}{2},$$

то есть нейтрон будет терять половину своей энергии.

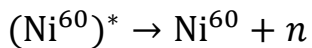
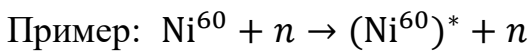
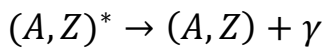
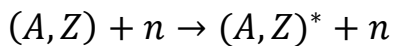
При увеличении  $A$  значение выражения  $\frac{2A}{(A+1)^2}$  будет все больше стремиться к нулю, что в свою очередь приведет уменьшению потерь энергии нейтрона.

Пример: если в качестве замедлителя будет выступать  $C^{12}$ , то

$$\langle E \rangle = E_0 \left(1 - \frac{2 \cdot 12}{(12+1)^2}\right) \approx 0,86E_0$$

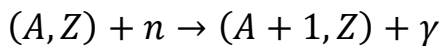
### 2.3 Неупругое рассеяние нейтронов

Нейтрон с энергией порядка нескольких сотен кэВ при попадании в ядро-мишень временно поглощается ей, переводя ядро в возбужденное состояние. После малого промежутка времени нейтрон переиспускается с уменьшенной энергией, а ядро-мишень остается в возбужденном состоянии. Затем ядро снимает возбуждение путем испускания гамма-квантов. Поскольку суммарная кинетическая энергия не сохраняется в этом процессе, он называется неупругим рассеянием нейтрона.

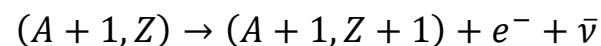


### 2.4 Радиационный захват нейтронов

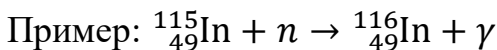
Вид ядерной реакции, в которой ядро атома поглощают нейтрон, вследствие чего увеличивается его массовое число:



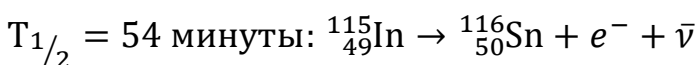
Ядро  $(A + 1, Z)$  образуется в возбужденном состоянии, которое распадается через излучение каскада гамма-квантов. Образовавшееся ядро обычно  $\beta^-$  – радиоактивное, то есть распадается по схеме :



Эффективное сечение и, следовательно, вероятность данной реакции выше для тепловых нейтронов, нежели для нейтронов с большей энергией.

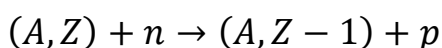


Образующийся в этом процессе изотоп  ${}_{49}^{116}\text{In}$  распадается с периодом полураспада

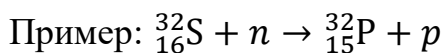


### 2.5 Реакции с образованием протонов

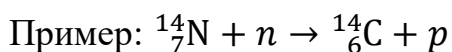
Под действием нейтронов с энергией  $E \approx 0,5-10 \text{ МэВ}$  происходит реакция вида  $(n,p)$ :



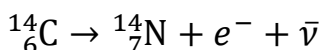
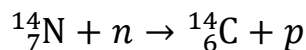
Эти реакции происходят при достаточно высокой энергии, так как протону приходится преодолевать кулоновский барьер при вылете из ядра.



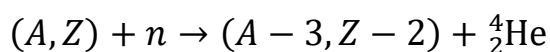
На более же легких ядрах реакция (n,p) происходит и с тепловыми нейтронами, так как кулоновский барьер для вылетающих протонов оказывается относительно невысок.



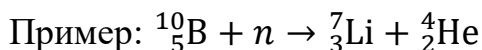
Возникающее ядро обычно является радиоактивным, так как отношение числа нейтронов к числу протонов в нем увеличивается и оно переходит в стабильное состояние за счет  $\beta^{-}$  – распада.



## 2.6 Реакции с образованием $\alpha$ – частиц



Для эффективного протекания (n,  $\alpha$ ) –реакций также нужны нейтроны с энергией  $E \approx 0,5-10$  МэВ. Лишь на легких ядрах эти реакции могут происходить даже для тепловых нейтронов, так как кулоновский потенциальный барьер, препятствующий вылету, относительно низок.



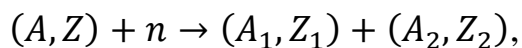
В данной реакции в результате вылета  $\alpha$  – частицы увеличивается относительное содержание нейтронов по сравнению с исходным ядром, поэтому ядро-продукт обычно  $\beta^{-}$  – радиоактивно.

## 2.7 Реакции деления

При облучении тяжелых ядер (Th, Cf, U, Pa, трансурановые элементы) нейтронами с энергией  $E > 1$  МэВ (а для некоторых изотопов урана и трансурановых элементов даже тепловыми нейтронами) происходит реакция деления тяжелого ядра на ядра-осколки. Характерной особенностью такого деления является то, что осколки, как правило, имеют существенно различные массы, отношение масс осколков в среднем



равно  $\sim 1,5$ . Ассиметричное деление объясняется оболочечной структурой ядра. Ядро стремится разделиться таким образом, чтобы осколки образовали наиболее устойчивые элементы.



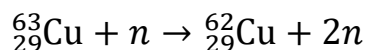
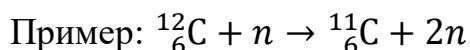
$$A_1 + A_2 = A + 1,$$

$$Z_1 + Z_2 = Z,$$

$$\frac{A_1}{A_2} \sim 1,5$$

## 2.8 Реакции с образованием двух или более нуклонов

Эти реакции идут при энергии нейтронов  $E > 10$  МэВ. Вероятность таких реакций возрастает с увеличением энергии падающего нейтрона. Большой порог подобной реакции объясняется тем, что энергия отделения нескольких нуклонов, чаще всего, больше, чем энергия отделения одного нуклона.



## 2.9 Вероятности нейтрон-ядерных реакций

Одной из основных величин, характеризующих ядерные реакции, является эффективное сечение или просто сечение, определяющее вероятность той или иной реакции. Зачастую, именно сечение реакции является критерием возможности использования того или иного процесса в практических целях. В таблице 1 приведены характерные величины сечения для нейтрон-ядерных реакций.

Области энергий и порядки величин сечений различных ядерных реакций под действием нейтронов

Тип реакции	Сечение реакции
Радиационный захват ( $n, \gamma$ )	Идёт на всех ядрах. Сечение: для тепловых нейтронов варьируется в широком интервале от 0,1 до $10^3$ и даже $10^4$ барн ( $\text{Xe}_{55}^{135}$ ); для быстрых нейтронов – от 0.1 до нескольких барн.
Упругое рассеяние ( $n, n$ )	Сечение варьируется в интервале нескольких барн.
Неупругое рассеяние ( $n, n'$ )	Пороговая реакция. Сечение по порядку величины несколько барн.
( $n, p$ )	Наиболее важные реакции: $n + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^3_1\text{H} + p + 0,76 \text{ МэВ}$ $\sigma_{\text{тепл.нейтр}} = 5400 \text{ барн,}$ $n + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + p + 0,63 \text{ МэВ}$ $\sigma_{\text{тепл.нейтр.}} = 1,75 \text{ барн.}$
( $n, \alpha$ )	Наиболее важные реакции: $n + {}^6_3\text{Li} \rightarrow {}^3_1\text{H} + \alpha + 4,78 \text{ МэВ}$ $\sigma_{\text{тепл.нейтр.}} = 945 \text{ барн,}$ $n + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \alpha + 2,79 \text{ МэВ}$ $\sigma_{\text{тепл.нейтр.}} = 3840 \text{ барн}$
( $n, 2n$ )	Пороговая реакция. Порог ~10 - 15 МэВ. Сечение: несколько десятых барн.
( $n, f$ )	В подавляющем большинстве случаев пороговая реакция. Сечение очень мало, исключая отдельные случаи ${}^{235}_{92}\text{U}$ , ${}^{238}_{92}\text{U}$ и т.д.

Нейтроны различных энергий нашли широкое практическое применение:

Исследование конденсированного состояния вещества (нейтронография)	Медленные и тепловые нейтроны
Исследование ядерной структуры	Быстрые и резонансные нейтроны
Исследование фундаментальных симметрий взаимодействий	Медленные и тепловые нейтроны
Нейтронный каротаж	Быстрые, резонансные и тепловые нейтроны
Медицина (выжигание раковых опухолей)	Медленные нейтроны
Активационный анализ изотопов	Тепловые нейтроны
Ядерная энергетика	Широкий спектр энергий

Исследуя протекание нейтрон-ядерных реакций (их количество, спектры испускаемых частиц, особенности изменения нейтронного потока) в веществе, можно получить информацию о его составе. Большая проникающая способность нейтронов и одного из основных продуктов нейтрон-ядерных реакций- гамма-квантов позволяет успешно использовать нейтроны для исследования крупных образцов вещества, в частности, горных пород, о чем пойдет речь далее.

### 3 Нейтронный гамма-каротаж

#### 3.1 Основы нейтронного гамма-каротажа

Нейтронный гамма-каротаж- метод геофизических исследований, основанный на взаимодействии нейтронов с веществом горных пород. В скважину опускают толстостенную стальную гильзу, содержащую нейтронный источник и детектор, регистрирующий вторичное излучение. Последнее возникает в результате взаимодействия нейтронов с веществом породы. Между источником и детектором устанавливается фильтр из парафина, Рb или Bi, препятствующий прямому попаданию нейтронов из источника в детектор. Сигналы детектора, усиленные и

сформированные с помощью электронных устройств, передаются по кабелю наверх для регистрации и анализа. Перемещая гильзу вдоль скважины, записывают каротажную диаграмму — зависимость скорости счёта сигналов от глубины. При нейтронном гамма-каротаже регистрируются гамма-кванты, возникающие как при неупругом рассеянии нейтронов, так возникающие и при захвате медленных нейтронов ядрами. Поэтому при этом методе геофизических исследований наиболее важными реакциями, соответственно, являются неупругое рассеяние нейтронов, а также упругое рассеяние нейтронов, которое позволяет замедлить нейтроны до тепловых энергий ( $\sim kT$ ), после чего происходит радиационный захват нейтрона с испусканием в дальнейшем регистрируемого гамма-кванта. В этом случае определяется относительное количество водорода в пластах, так как именно водород — наиболее эффективный замедлитель нейтронов, то в породах с порами, заполненными водой или нефтью, нейтроны замедляются уже на небольших расстояниях от источника.

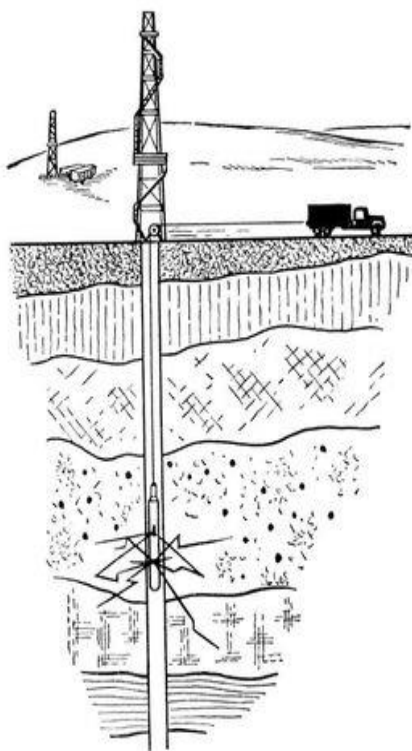


Рис. 2: Нейтронный гамма- каротаж

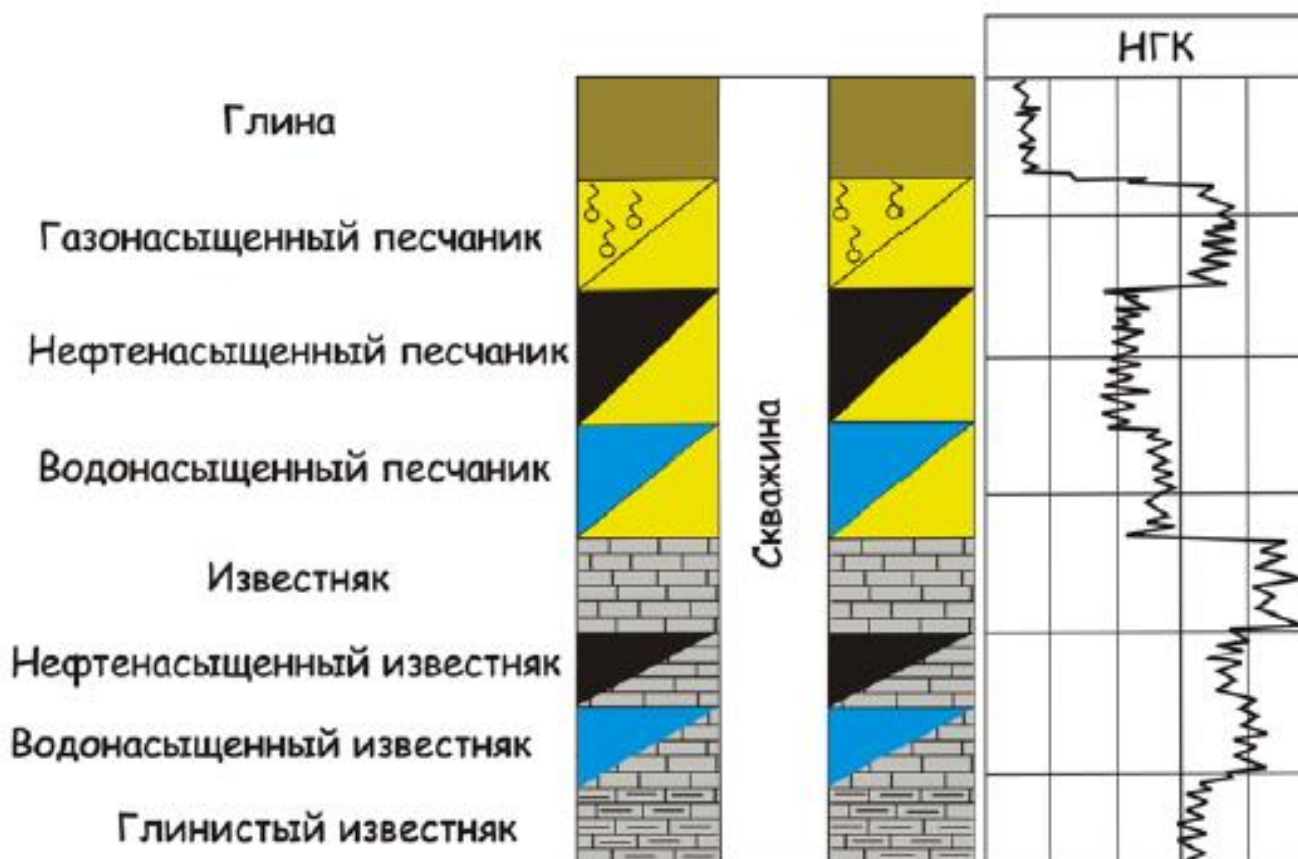


Рис. 3: Гамма-спектры, полученные для различных слоев вещества

### 3.2 Преимущества и недостатки в сравнении с другими методами каротажа

Как было отмечено выше, нейтронный каротаж является высокочувствительным к содержанию водорода в исследуемой среде. Этот параметр мало поддается исследованию с помощью электрических методов каротажа. Кроме того, ядерные методы возможно использовать не только в открытом (не обсаженном трубами) стволе скважины, но и в закрытом, когда многие электрические методы принципиально неприменимы. При использовании нейтронного каротажа, основанного на неупругом рассеянии нейтронов, возникают сложности с оценкой вклада бурового раствора в результат измерений, так как он содержит большое количество воды, кроме того, буровой раствор может впитываться в пористые породы. Непостоянный диаметр скважины и, как следствие, разная толщина «прослойки» бурового раствора между стенкой скважины и геофизическим зондом усложняют задачу. Особые требования предъявляются и к детектору гамма-

излучения. События, произошедшие в детекторе, не должны мешать определению элементного состава исследуемого вещества, и поэтому материал, из которого сделан детектор, не должен включать в себя элементы, содержащиеся в исследуемой породе.

### 3.3 Основные типы детекторов гамма-квантов и источников нейтронов при использовании нейтронного гамма-каротажа

В настоящее время для регистрации гамма-квантов применяются сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы.

Сцинтилляционный детектор состоит из сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Детектирование гамма-квантов происходит по вторичным заряженным частицам, образующимся при взаимодействии гамма-квантов с веществом сцинтиллятора. При прохождении заряженных вторичных частиц через вещество сцинтиллятора их энергия тратится на его возбуждение и ионизацию. Переходы с возбужденных состояний на более низкие уровни энергии сопровождаются излучением фотонов. Возникшие в сцинтилляторе фотоны попадают через светопровод на фотокатод. Под действием фотонов происходит фотоэффект на фотокатоде с вылетом электронов, которые попадают в систему фотокатод–диноды. В результате электронной эмиссии на динодах электроны выбивают из них электроны, образуя нарастающую от динода к диноду электронную лавину. Между динодами поддерживаются разности потенциалов, благодаря чему общий коэффициент усиления ФЭУ, имеющих обычно от 10 до 14 динодов, достигает величин порядка  $10^6 - 10^9$ . Амплитуда импульса напряжения, создаваемого на нагрузке последнего динода ФЭУ, пропорциональна энергии, потерянной частицей в сцинтилляторе.

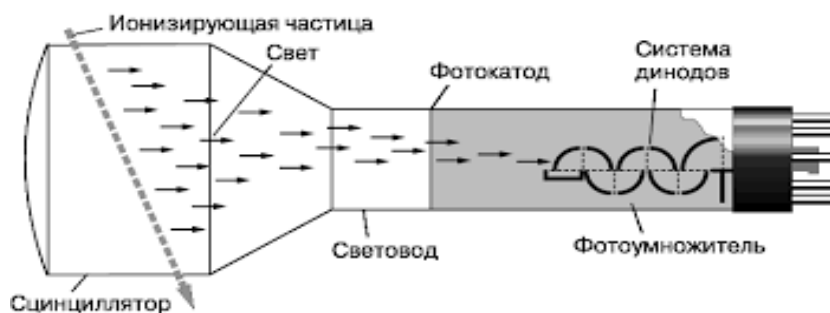


Рис. 4: Сцинтилляционный детектор

Полупроводниковые детекторы представляют собой твердотельную ионизационную камеру, в которой при поглощении ионизирующих излучений образуются носители заряда - электроны и дырки. Для полупроводниковых детекторов обычно используются кремний и германий, причем именно германиевые детекторы используются для регистрации гамма-квантов. В полупроводниковом детекторе создается область, в которой отсутствуют свободные носители заряда. Заряженная частица, пролетая через эту обедненную область детектора, производит пары электрон-дырка вдоль своей траектории. Средняя энергия, необходимая для образования одной электронно-дырочной пары, составляет 2.95 эВ для германия при температуре 80 К. Количество электронно-дырочных пар пропорционально потерям энергии частицы. Для измерения энергии частицы, необходимо, чтобы она потеряла всю свою энергию и остановилась в чувствительной области. Под действием приложенного к детектору электрического поля, электроны движутся к аноду, а дырки - к катоду. Собранные заряды образуют токовый импульс, интеграл которого несет информацию об энергии, которую частица потеряла в чувствительной области. Токовый импульс детектора поступает в зарядочувствительный предусилитель, а затем – аналого-цифровой преобразователь (АЦП). АЦП генерирует число, линейно зависящее от амплитуды сигнала на выходе усилителя. Таким образом, число, которое генерирует АЦП, пропорционально энергии частицы.

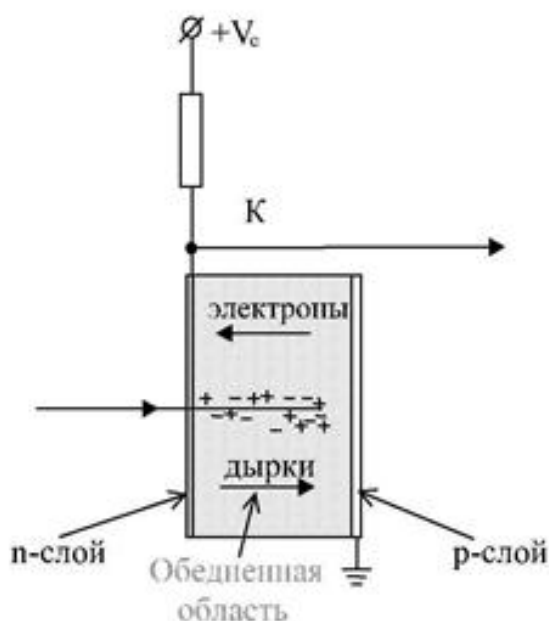


Рис. 5: Полупроводниковый детектор

Нейтронный каротаж с источником непрерывного действия не дает возможности надежно отличать пласты, насыщенные водой и нефтью, так как они как замедлители нейтронов неразличимы. Для этой цели эффективнее оказался нейтронный каротаж с импульсным источником нейтронов. Пластовая вода обычно содержит минеральные соли, в то время как в нефти они отсутствуют. Из-за поглощения нейтронов в С1 время жизни тепловых нейтронов в пласте, содержащем воду, меньше, чем в нефтяном пласте.

- 0,3 – 0,6 мс — данное время жизни характерно для пористых пластов, насыщенных пресной водой или нефтью;
- 0,11 – 0,33 мс — данные значения характерны для пластов, насыщенных минерализированной водой;
- 0,6 – 0,8 мс — по такому времени жизни можно говорить о том, что пласт насыщен природным газом.

При использовании нейтронного каротажа возможны 3 вида источника нейтронов:

а) источники, на основе  $(\alpha, n)$ -реакции;



б) источники нейтронов спонтанного деления;

в) нейтроны, получаемые с помощью ускорителей заряженных частиц.

Рассмотрим поочередно каждый из этих видов источников.

#### Источники, на основе $(\alpha, n)$ -реакции.

Материал  $(\alpha, n)$ -источников нейтронов представляет собой однородную смесь излучателя  $\alpha$ -частиц с веществом мишени, из ядер которого испускаются нейтроны. Нейтронные  $(\alpha, n)$ -источники характеризуются непрерывным спектром; диапазон энергий нейтронов (0,1-15) МэВ. Характер спектра определяется энергией  $\alpha$ -частиц, материалом мишени, а также конструкцией источника и технологией изготовления радиоактивного материала (активной части источника). В качестве источников  $\alpha$ -частиц используются  $\alpha$ -активные изотопы  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ .  $(\alpha, n)$ -реакции могут иметь место, например, для следующих веществ-мишеней  $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ .

#### Источники нейтронов спонтанного деления.

Примером такого источника служит  $^{252}\text{Cf}$ . Радионуклид  $^{252}\text{Cf}$  распадается по механизму  $\alpha$ -распада (96,3 %) и спонтанного деления (3,1 %). Нейтронное излучение  $^{252}\text{Cf}$  состоит, в основном, из нейтронов спонтанного деления. Один акт спонтанного деления сопровождается испусканием 3-4 нейтронов со средней энергией 2,3 МэВ. Кроме того, в спектре нейтронного излучения возможно присутствие нейтронов, образующихся по  $(\alpha, n)$ -реакции на легких ядрах, например, кислорода или азота. (На практике источники с  $^{252}\text{Cf}$  не используются ввиду своей высокой стоимости.)

#### Нейтроны, получаемые с помощью ускорителей заряженных частиц.

В нейтронных генераторах обычно используются реакции  $t(d, n)^4\text{He} \Leftrightarrow d+t=^4\text{He}+n$  (энергия нейтрона 14,1 МэВ) и  $d(d, n)^3\text{He} \Leftrightarrow d+t=^3\text{He}+n$  (энергия нейтрона 2,45 МэВ).

Энергия ускоренных частиц в таких нейтронных генераторах обычно 100 – 300 кэВ. Как правило, ускоряются дейтроны. Так как энергия этих реакций заметно больше энергии ускоряемых частиц, спектр генерируемых нейтронов близок к моноэнергетическому.

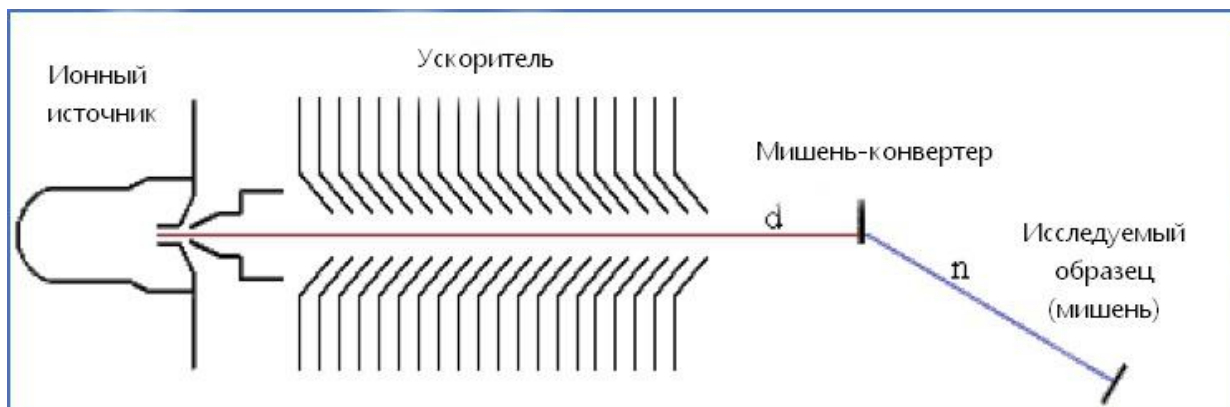


Рис. 6: Нейтронный генератор

#### 4 Моделирование нейтронного гамма-каротажа в Geant4

В данной работе была создана модель, симулирующая процесс нейтронного-гамма каротажа. Созданная модель представляет собой:

- 1) кристалл NaI диаметром 110 мм, длиной 200 мм;
- 2) стальную зонд-трубу толщиной 2 мм, длиной 1000 мм, диаметром 120 мм;
- 3) источник нейтронов: изотропный, расположенный на расстоянии 10 см от кристалла,  $E_n = 14.1$  МэВ, испускается  $10^8$  нейтронов.

Скважина:

- 1) Стальная обсадная труба  $d = 146$  мм, толщина 6,5 мм;
- 2) Смесь из породы, нефти, воды, бурового раствора-толщина 50 мм;
- 3) Смесь из породы, нефти, нефти, воды-толщина 3 м.

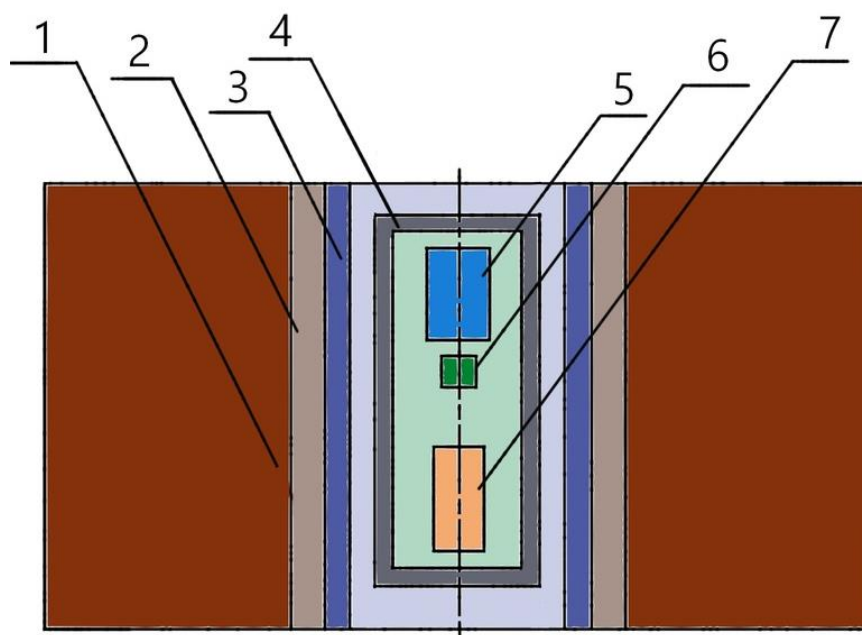


Рис.7: Осевое сечение модели, созданной в Geant4

На Рис. 7 цифрами обозначены:

- 1- порода без примеси бурового раствора;
- 2- порода с буровым раствором;
- 3- стальная обсадная труба;
- 4- стальной зонд;
- 5- кристалл NaI;
- 6- точечный источник нейтронов;
- 7- детектор гамма-квантов.

Были рассмотрены три варианта с различными концентрациями нефти и воды в породе одного типа:

- Песчаник, не содержащий нефти в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см. (1)
- Песчаник, содержащий 20% нефти по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см. (2)
- Песчаник, содержащий 20% воды по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см. (3)

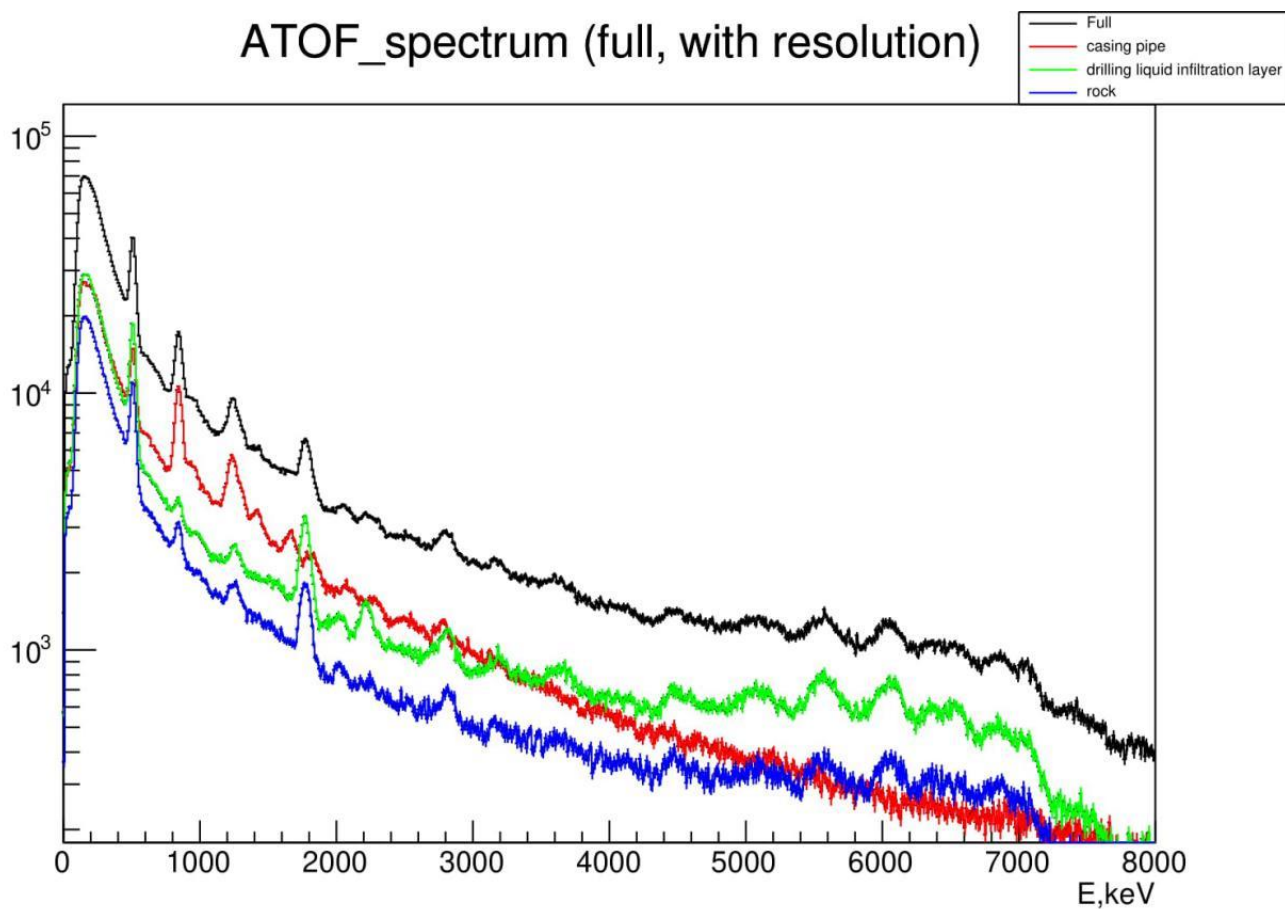


Рис. 8: Гамма-спектры, полученные с учетом разрешения детектора для песчаника, не содержащего нефти в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

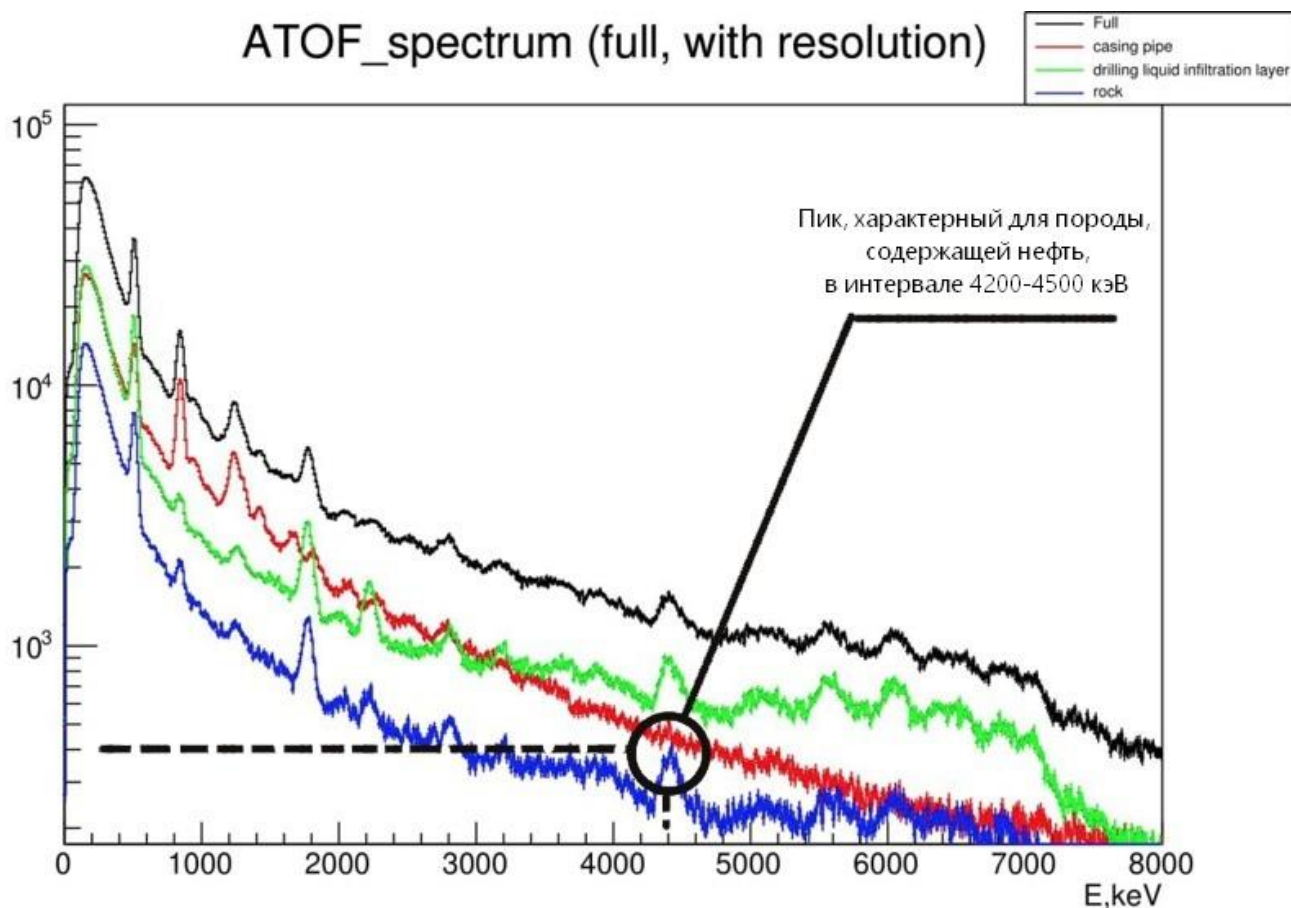


Рис. 9: Гамма-спектры, полученные с учетом разрешения детектора для песчаника, содержащего 20% нефти по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

Стоит отметить, что наличие энергетического разрешения у детектора приводит к исчезновению некоторых пиков. Это можно видеть на следующих графиках:

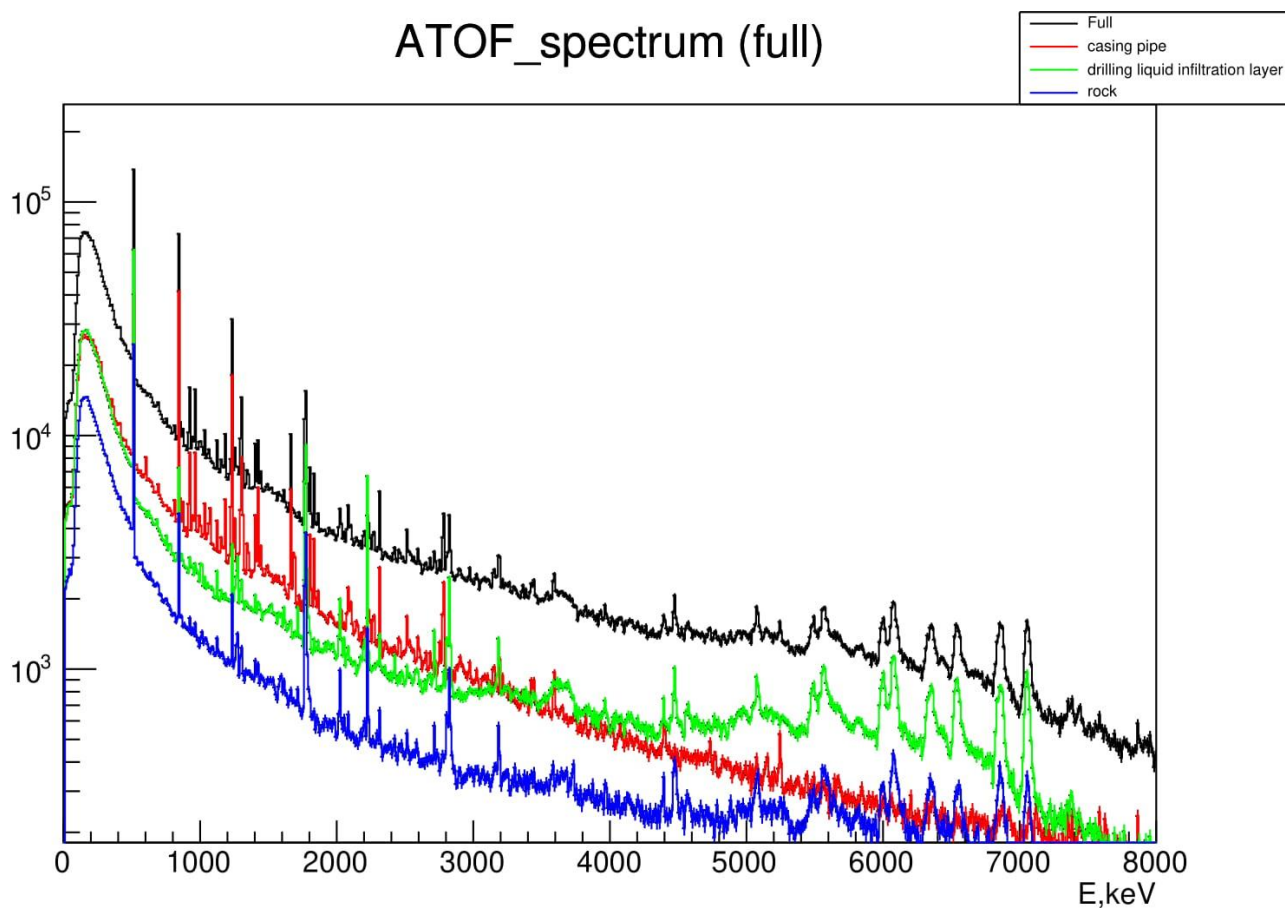


Рис. 10: Гамма-спектры, полученные без учета разрешения детектора для песчаника, содержащего 20% воды по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

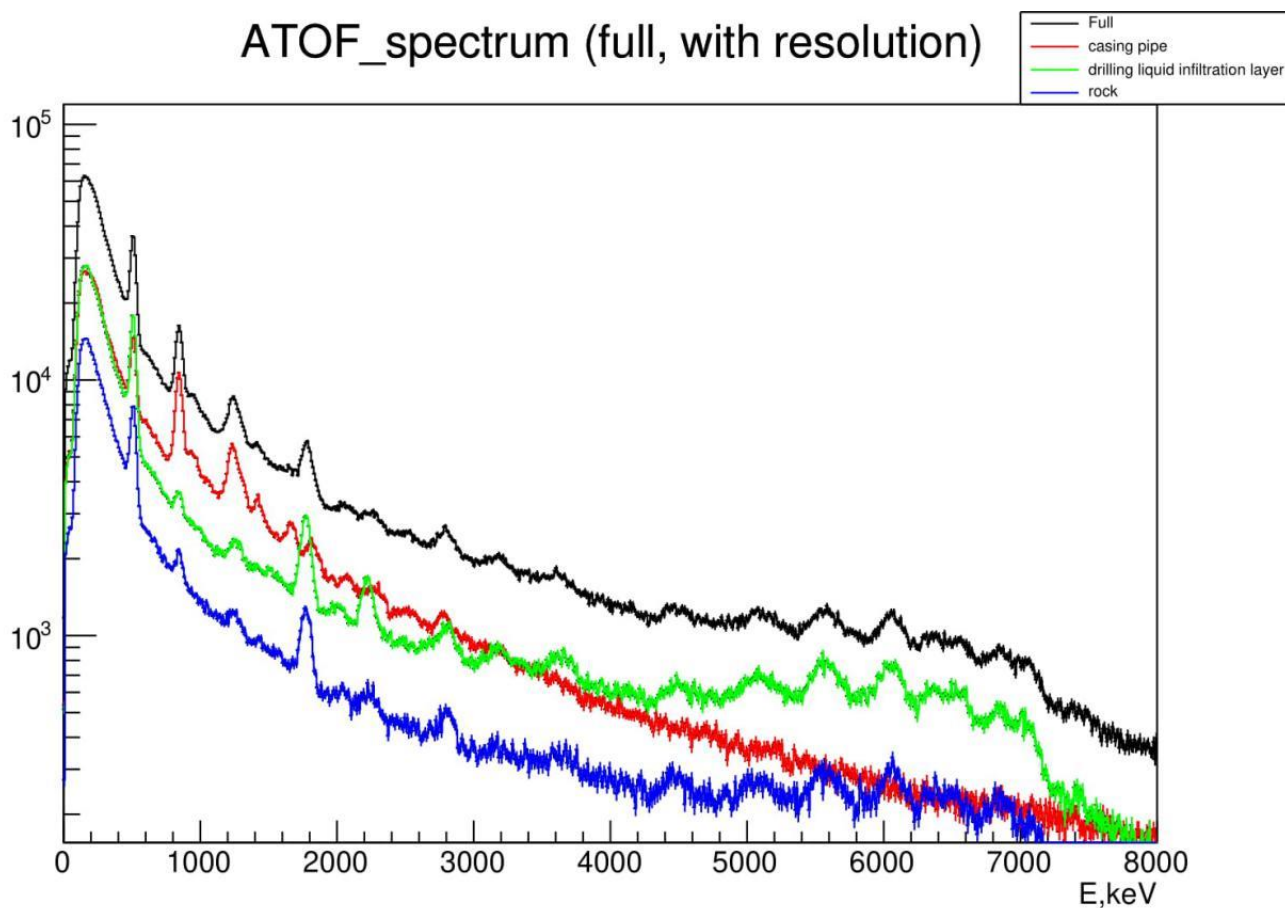


Рис. 11: Гамма-спектры, полученные с учетом разрешения детектора для песчаника, содержащего 20% воды по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

Нефть и вода содержат в себе водород, который является наиболее эффективным замедлителем нейтронов. В случае (1) в песчанике нет ни нефти, ни воды, из-за чего нейтроны проникают в толщу породы на большую глубину.

Это наглядно видно из следующих графиков:

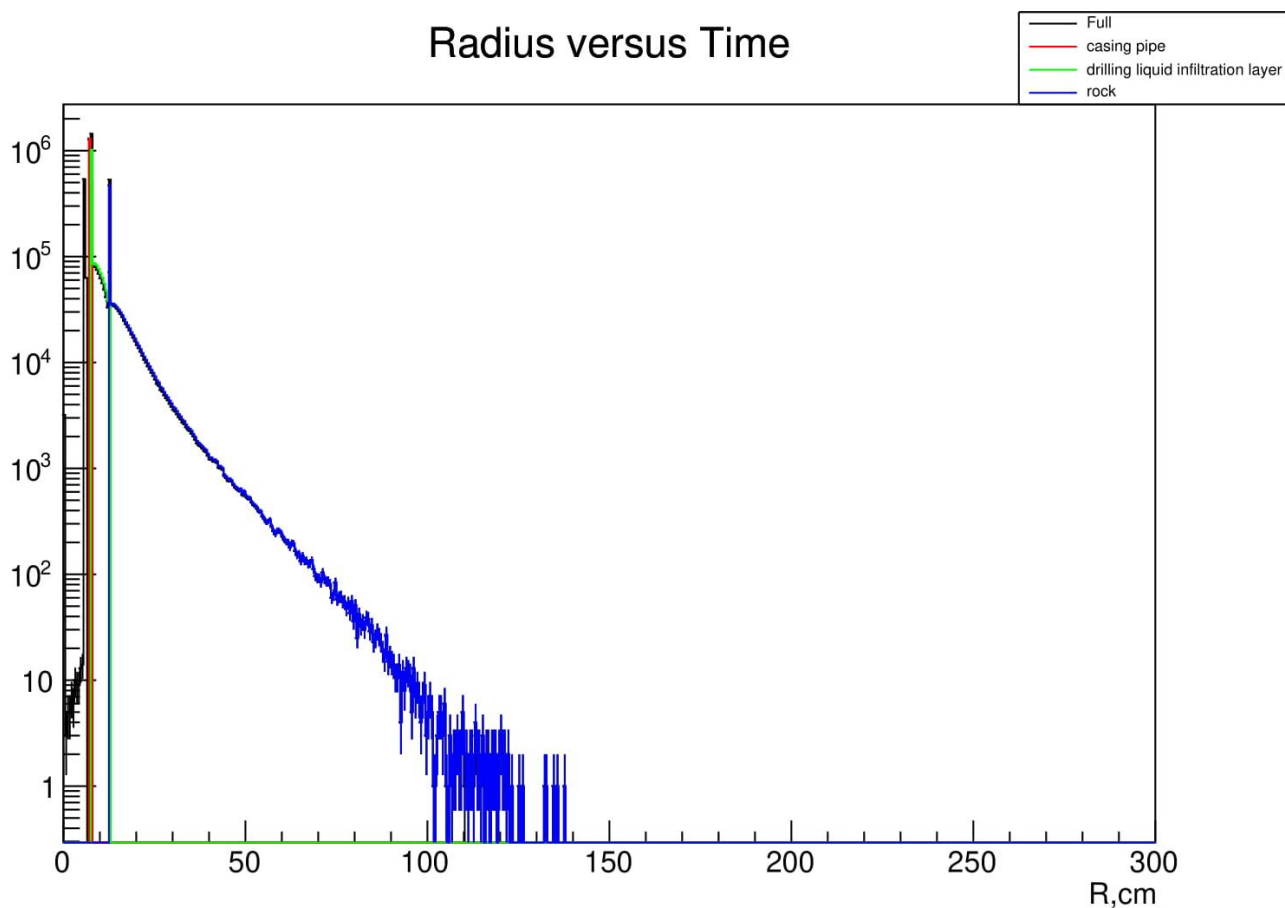


Рис. 12: Распределения событий, приводящих к испусканию гамма-кванта, в радиальном направлении от центра скважины для песчаника, не содержащего нефти в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см



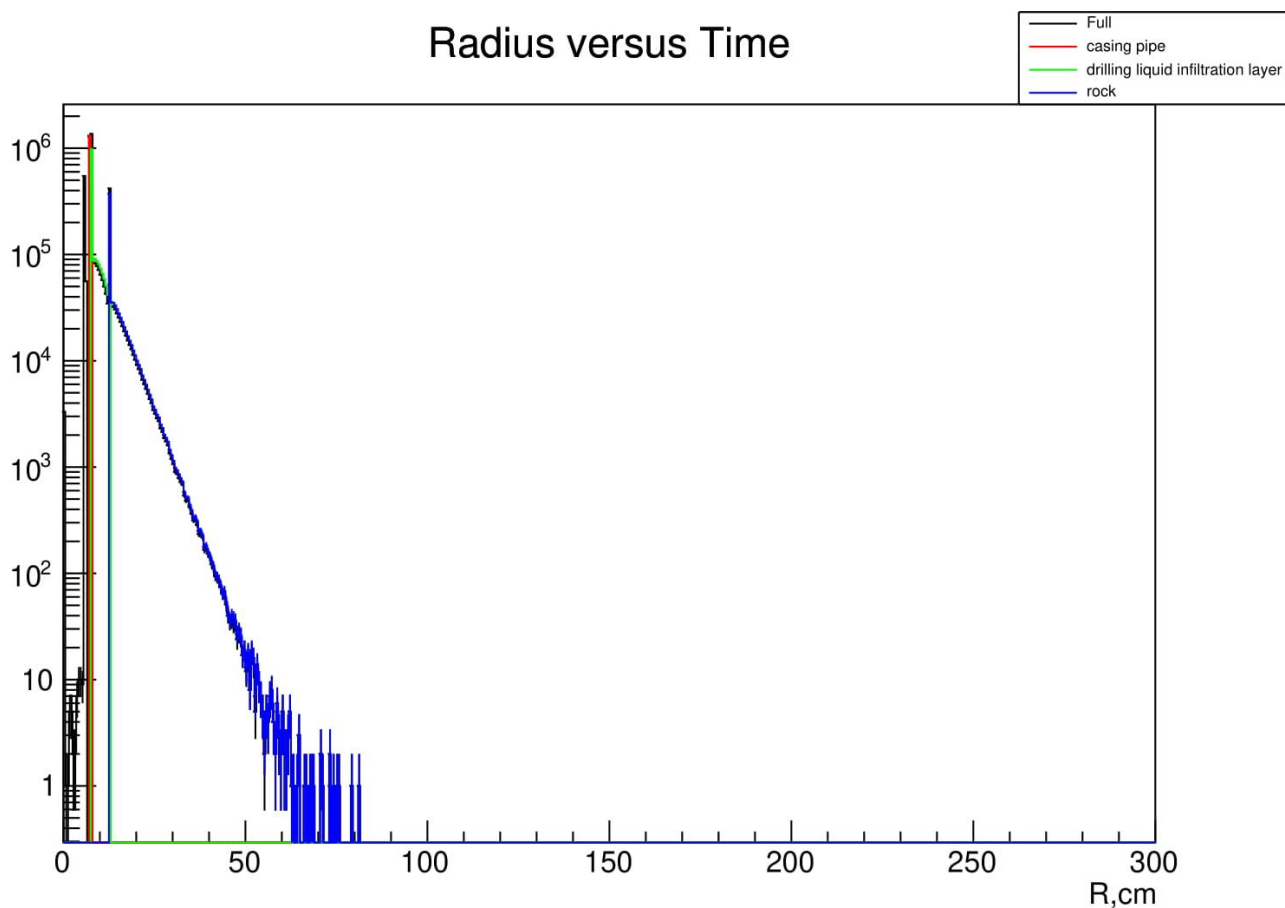


Рис. 13: Распределения событий, приводящих к испусканию гамма-кванта, в радиальном направлении от центра скважины для песчаника, содержащего 20% нефти по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

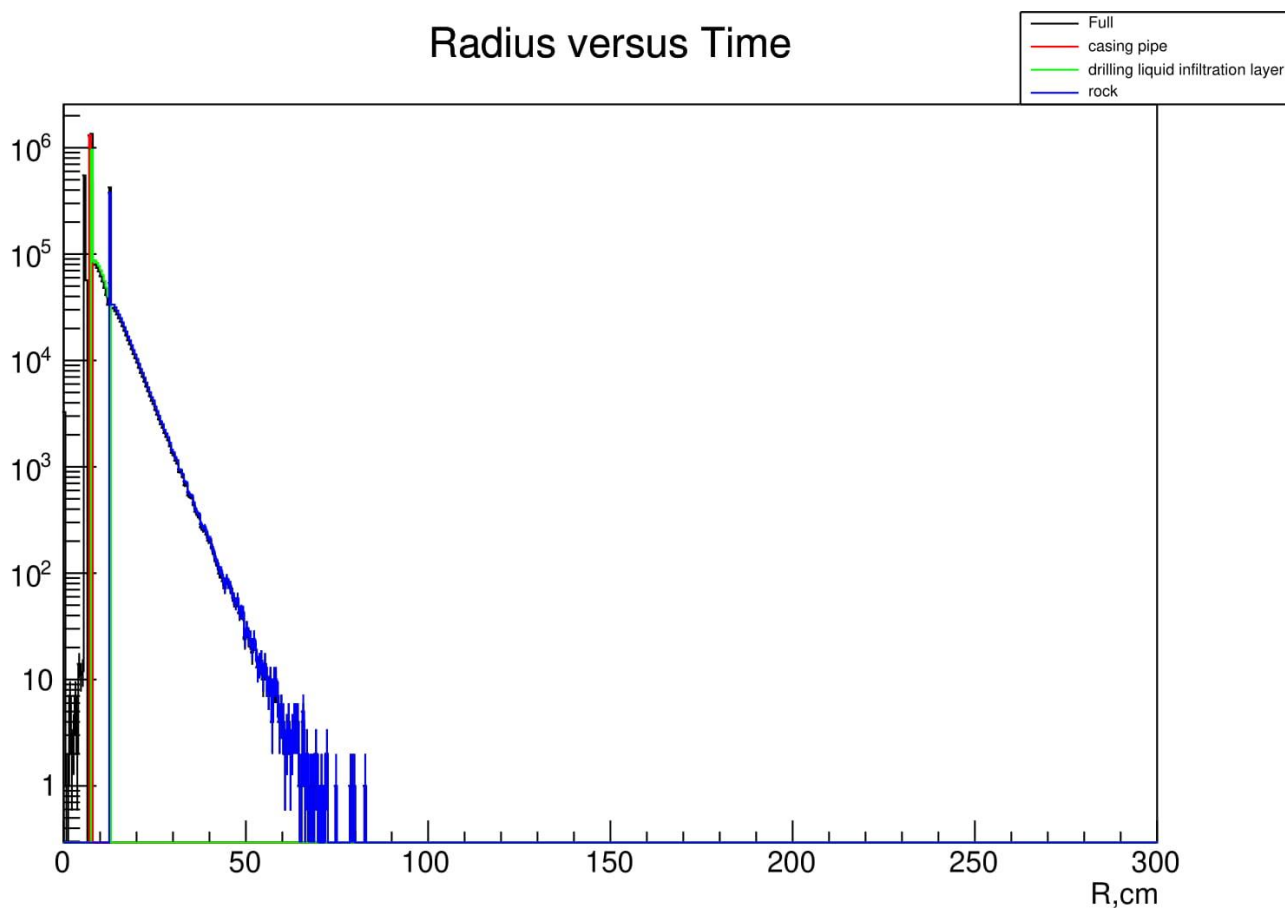


Рис. 14: Распределения событий, приводящих к испусканию гамма-кванта, в радиальном направлении от центра скважины для песчаника, содержащего 20% воды по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

Зададимся вопросом возможно ли отличить породу, содержащую воду, и породу, содержащую нефть. Можно заметить из Рис. 8, Рис. 9 и Рис. 10, что в гамма-спектре песчаника с нефтью, в отличие от песчаника с водой наблюдается характерный пик в области 4200-4500 кэВ из-за наличия в нефти углерода.

Это можно заметить на следующих графиках:

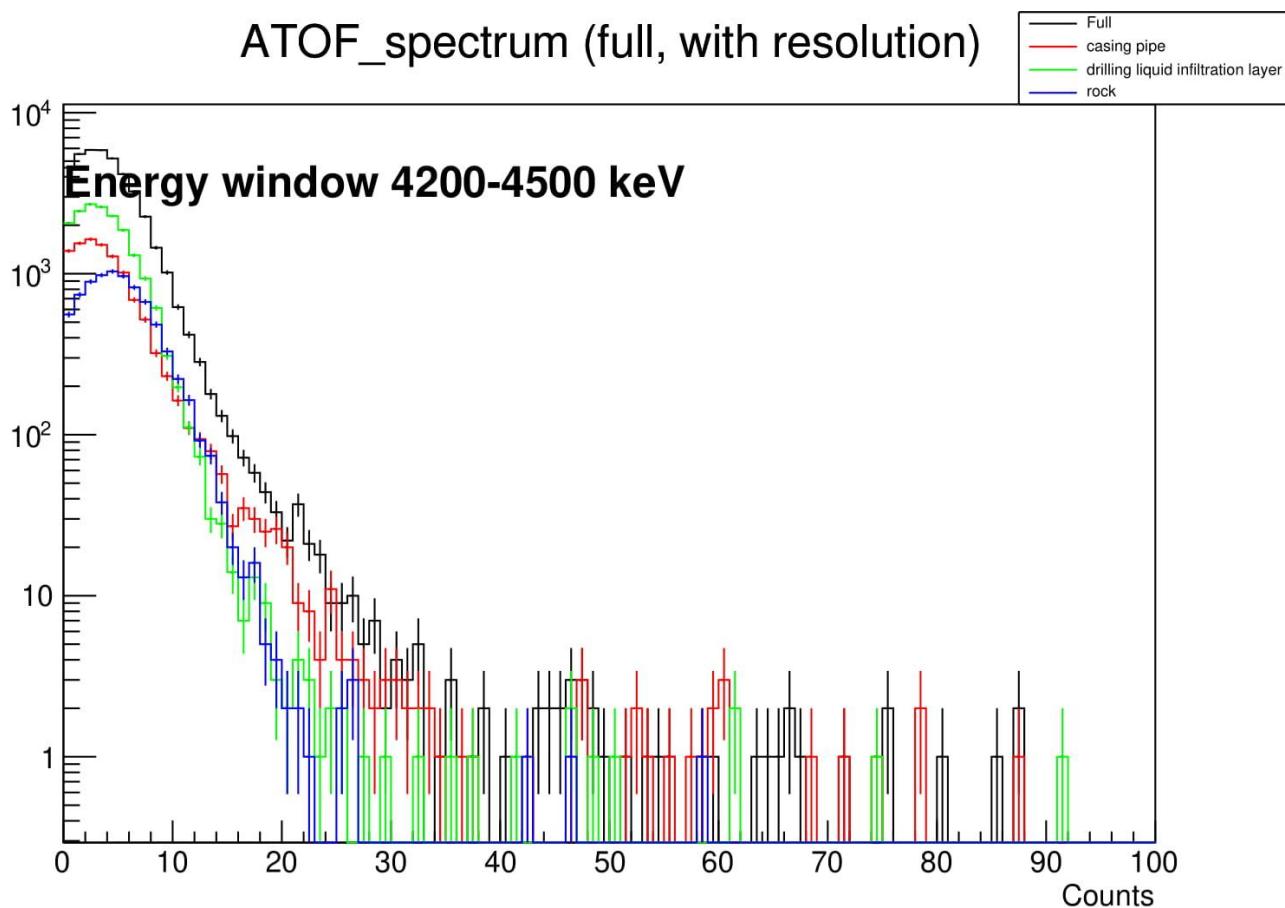


Рис. 15: Временные распределения событий в интервале 4200-4500 кэВ (с учетом разрешения) для песчаника, содержащего 20% нефти по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

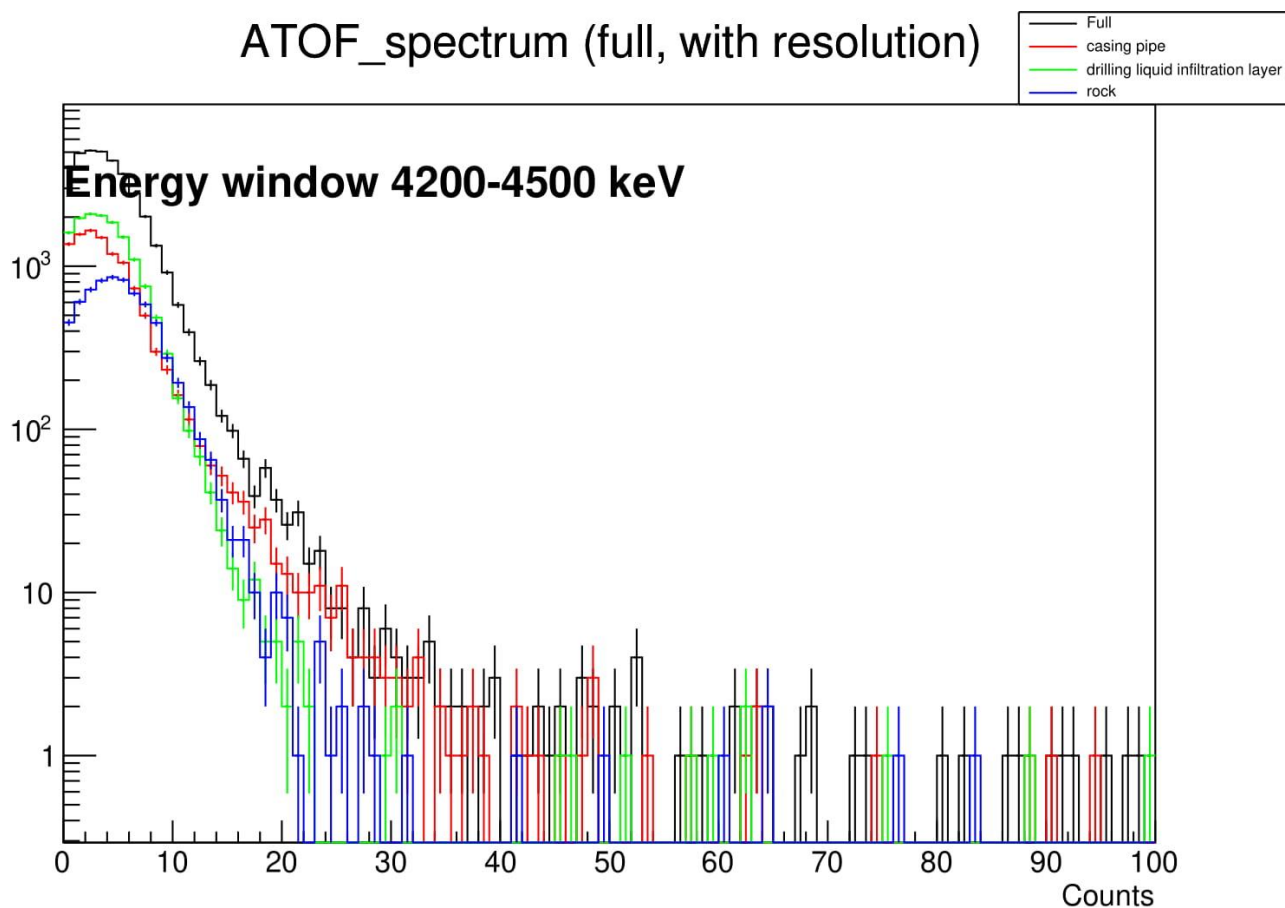


Рис. 16: Временные распределения событий в интервале 4200-4500 кэВ (с учетом разрешения) для песчаника, содержащего 20% воды по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

Проанализируем полученные временные спектры:

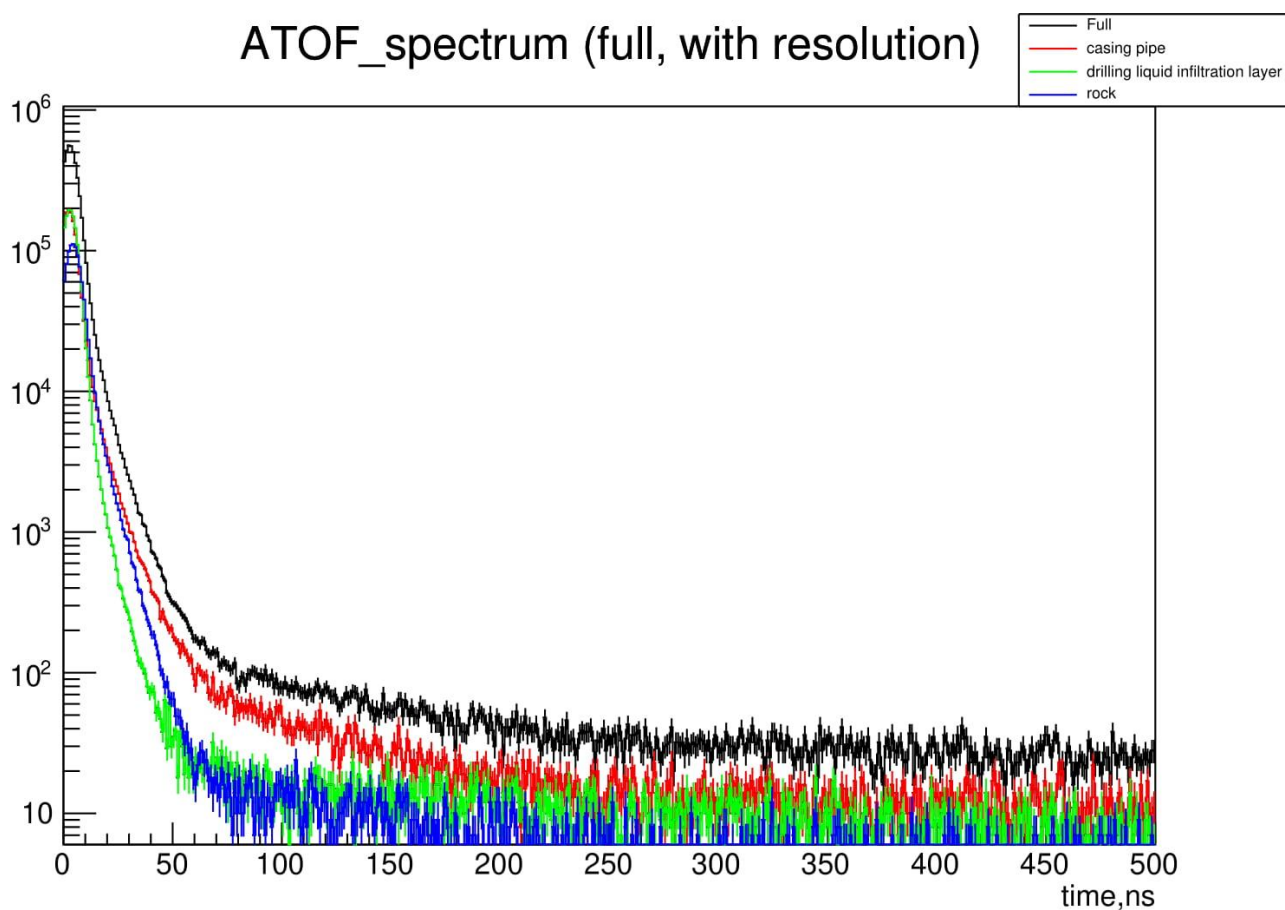


Рис. 17: Временной спектр, полученный с учетом разрешения детектора, для песчаника, не содержащего нефти в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

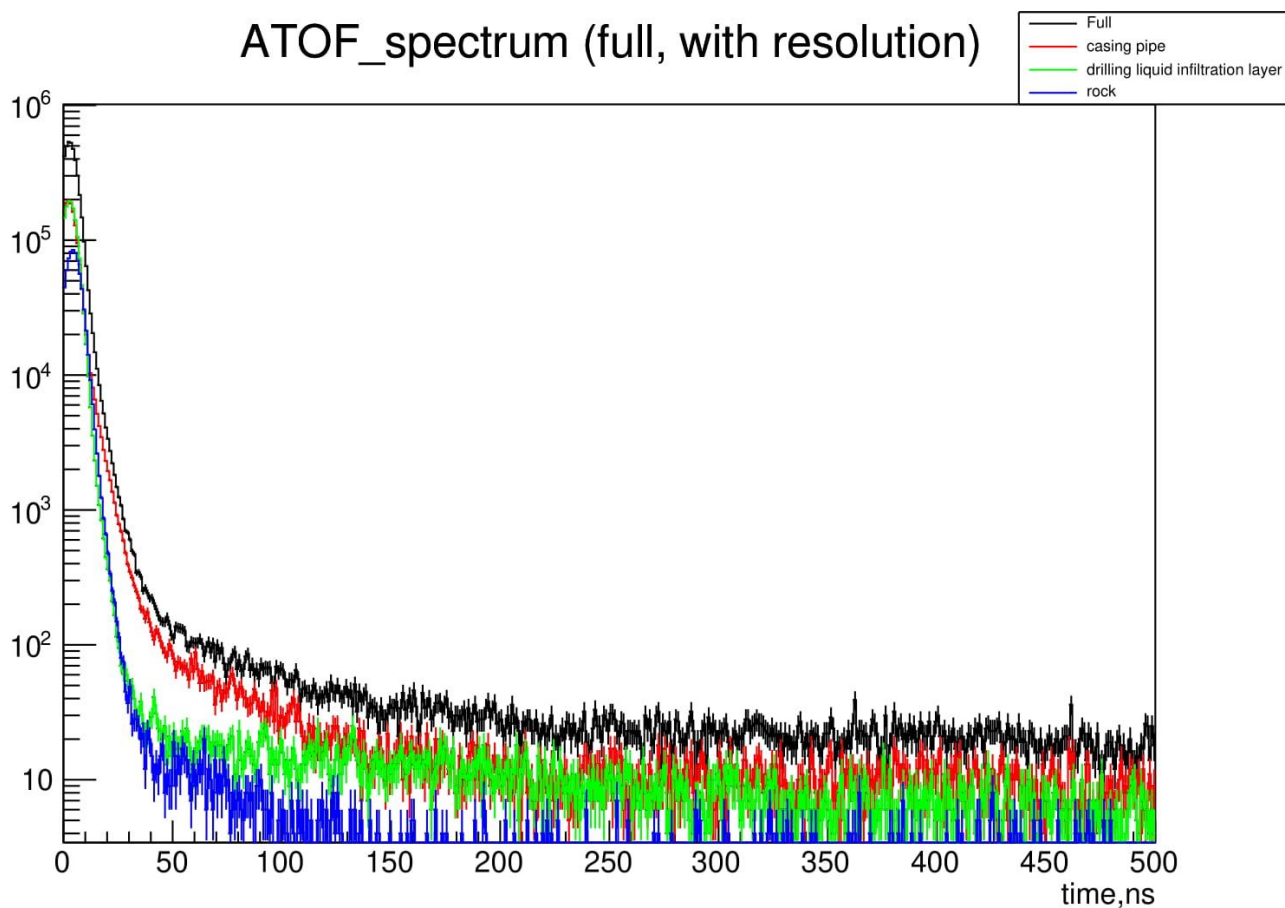


Рис. 18: Временной спектр, полученный с учетом разрешения детектора, для песчаника, содержащего 20% нефти по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

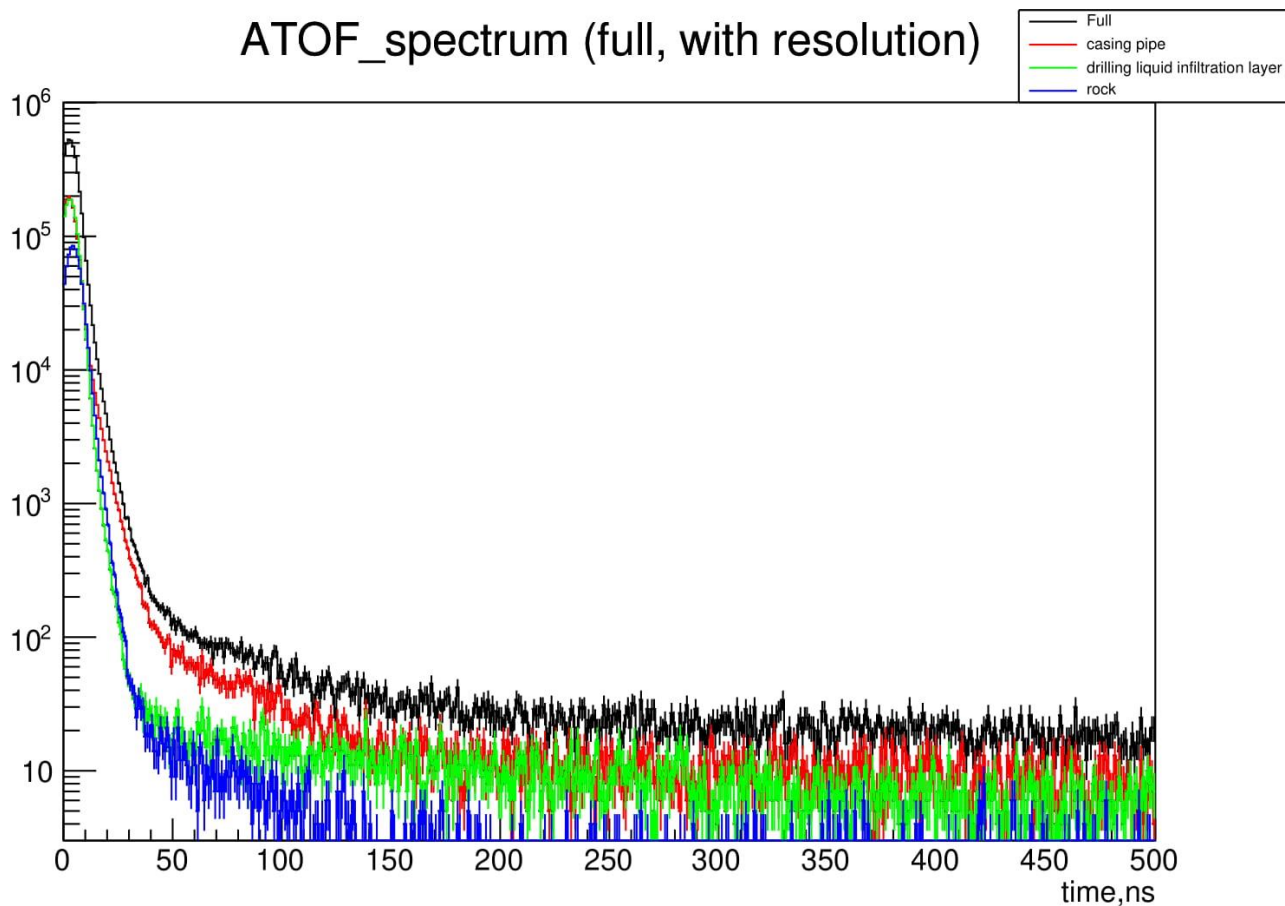


Рис. 19: Временной спектр, полученный с учетом разрешения детектора, для песчаника, содержащего 20% воды по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

Можно заметить, что вклад слоя с буровым раствором и от обсадной трубы одинаков во всех трех случаях.

Проведем грубую оценку времени, за которое вылетевший нейтрон достигнет края слоя с породой ( $\approx 3,5$  метра в радиальном направлении от центра скважины, но из графиков видно, что нейтроны удаляются от источника до 50 см по радиусу в породе с замедлителем и до 100 см без него) и испустившийся гамма-квант достигнет детектора.

Вычислим скорость испускаемого нейтрона:

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 14,1 \text{ МэВ}}{938,57 \text{ МэВ}/c^2}} \approx 0,17c \approx 51000000 \text{ М/с} \approx 5 \text{ см/нс}$$

Время, прошедшее от испускания нейтрона до испускания гамма-кванта на краю породы:

$$t_1 = \frac{l}{v} \approx \frac{3,5 \text{ м}}{51000000 \text{ м/с}} \approx 69 \text{ нс}$$

Время, прошедшее от испускания гамма-кванта до его регистрации:

$$t_2 = \frac{l}{c} \approx \frac{3,5 \text{ м}}{299792458 \text{ м/с}} \approx 12 \text{ нс}$$

Время, прошедшее от испускания нейтрона до регистрации гамма-кванта:

$$t = t_1 + t_2 \approx 81 \text{ нс}$$

Однако, как видно из Рис. 16, Рис. 17 и Рис. 18 для детектирования достаточно большого числа событий уходит значительно большее время (вплоть до 500 нс).

Время, прошедшее от испускания гамма-кванта до его регистрации, более чем в 5 раз меньше времени, прошедшего от испускания нейтрона до испускания гамма-кванта на краю породы. Основную роль в увеличении времени будет нести упругое рассеяние нейтронов, из-за которого они многократно меняют свое направление и уменьшают скорость. Как уже было отмечено выше, водород является наиболее эффективным замедлителем нейтронов. По этой причине в пластах, содержащих воду и нефть (которые в свою очередь содержат водород) нейтроны задерживаются на большее время, чем в пластах без них.

Слой породы с буровым раствором во всех случаях имеет толщину  $d = 50$  мм.

Нейтрон с энергией  $E_n = 14.1$  МэВ пролетает это расстояние за время (без учета рассеяния в слое):

$$t_2 = \frac{d}{v} \approx \frac{0,05 \text{ м}}{51000000 \text{ м/с}} \approx 1 \text{ нс}$$

Нейтроны вылетают из источника во всех направлениях, а не узким пучком, при этом они испытывают замедление, из-за чего достигают области с буровым раствором за различное время, что затрудняет разделение событий из области с буровым раствором и из незагрязненной породы.



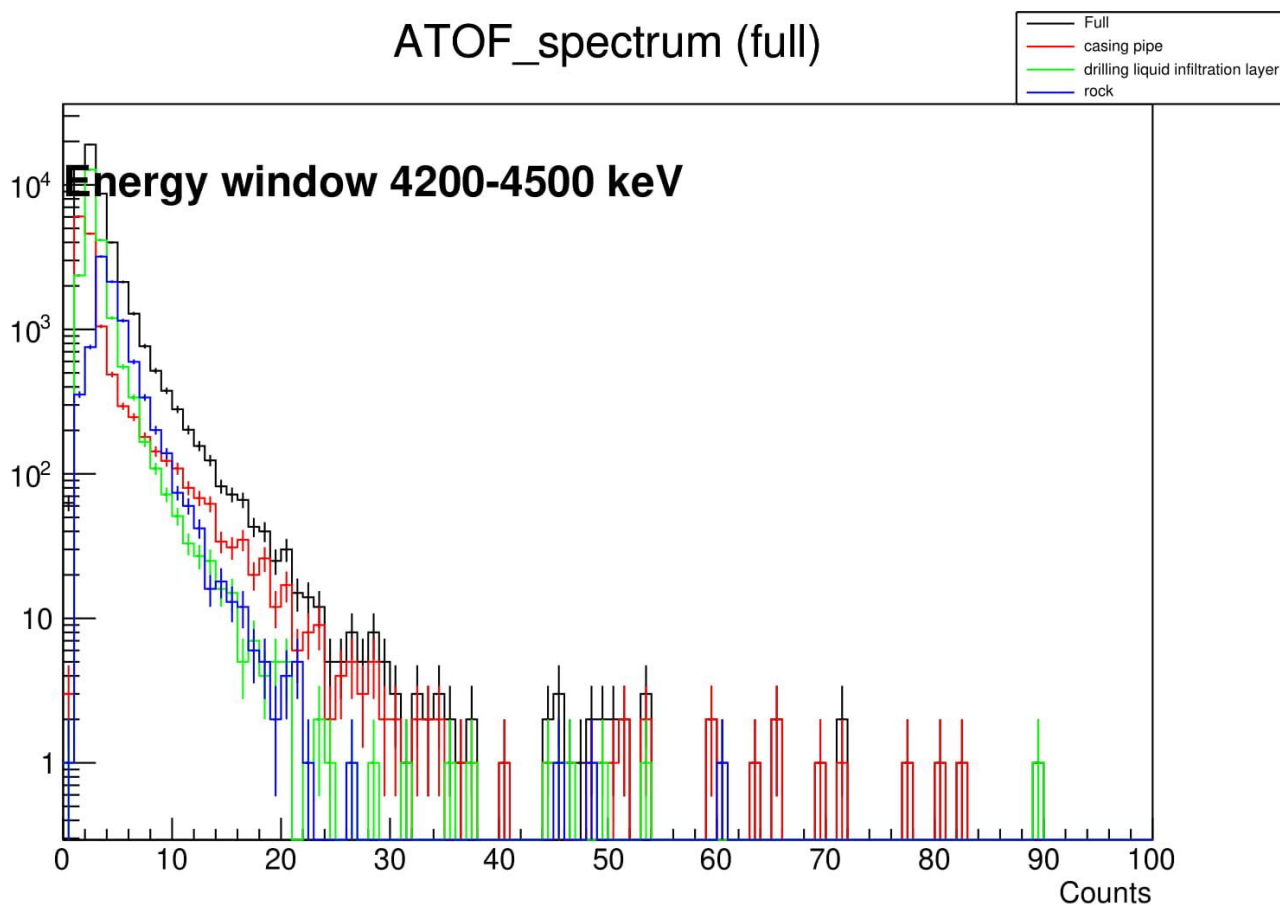


Рис. 20: Временные распределения событий в интервале 4200-4500 кэВ (без учета разрешения) для песчаника, содержащего 20% нефти по массе в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

Из Рис. 20 видно, что количество событий в энергетическом интервале 4200-4500 кэВ из породы превышает число событий из области с буровым раствором на временном отрезке 6-16 нс, поэтому отдельно были построены энергетические спектры в этом временном интервале. (Рис. 21, 22)

Рассмотрим это на примере слоя без нефти и воды:

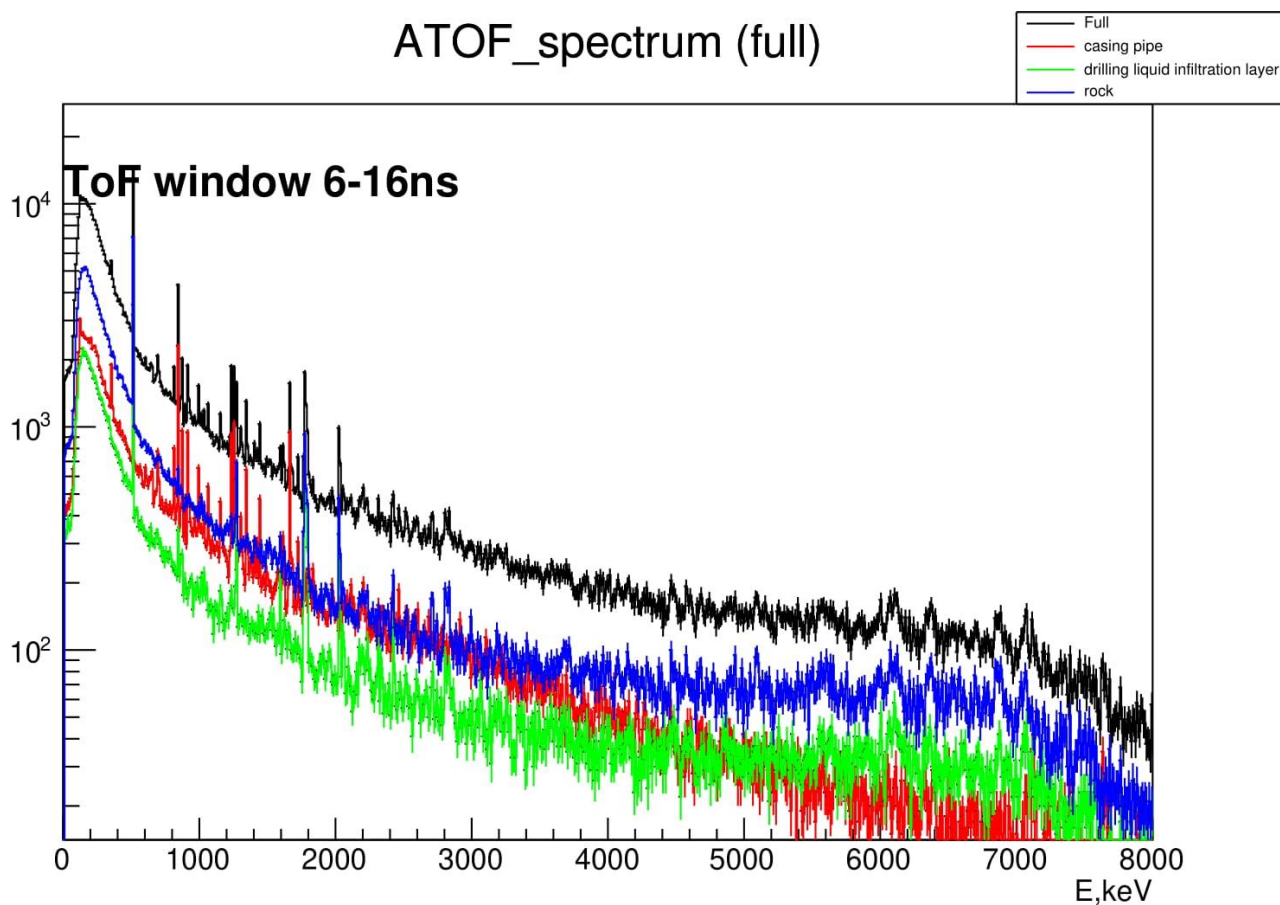


Рис. 21: Гамма-спектр, полученный без учета разрешения детектора, во временном окне 6-16 нс для песчаника, не содержащего нефти в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

Из-за временного разрешения детектора (3 нс) разделение событий из породы без бурового раствора и с ним ухудшается, количество событий из слоя с буровым раствором практически сравнивается с количеством событий без него. Эту проблему можно решить, повысив разрешение детектора, например, до 1 нс.

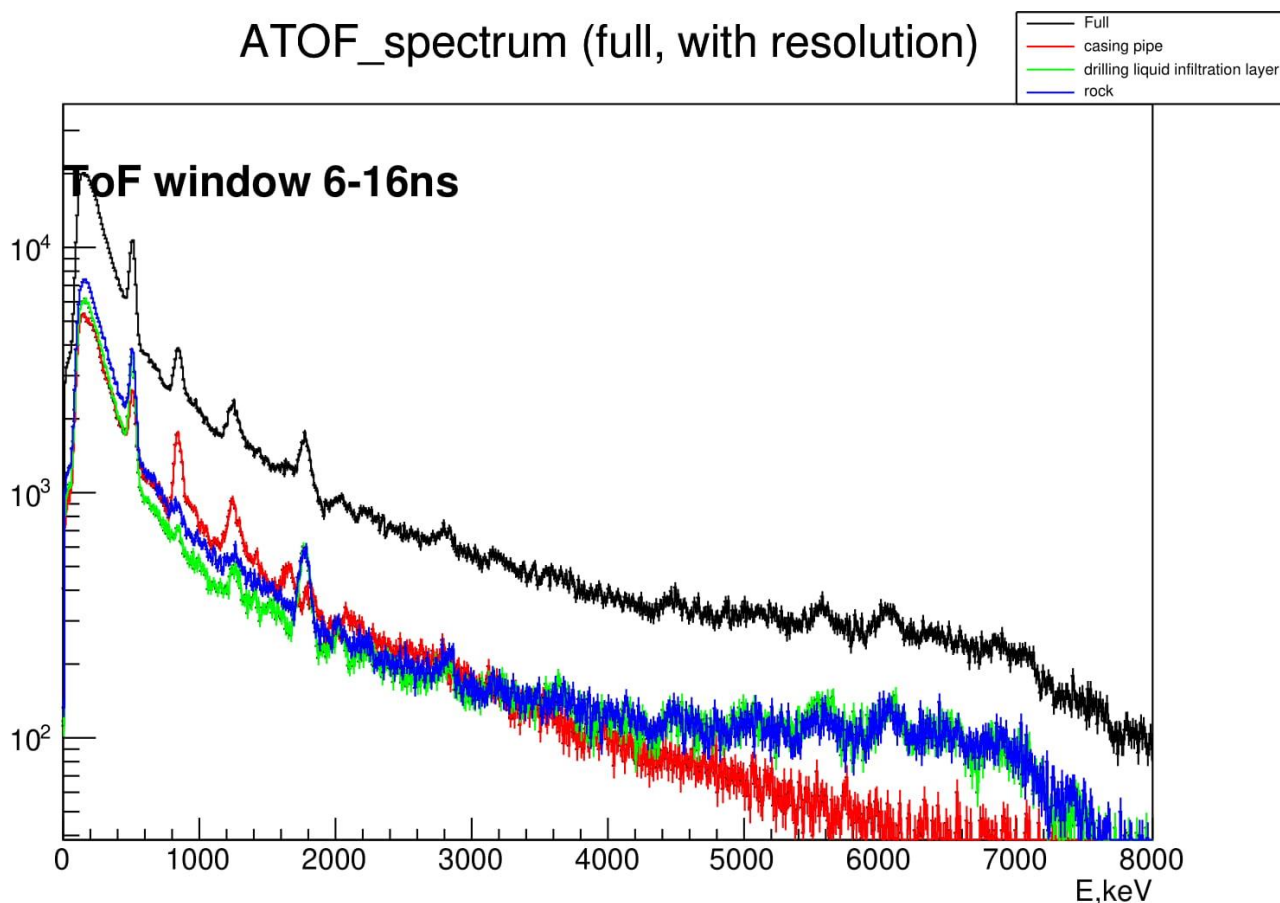


Рис. 22: Гамма-спектр, полученный с учетом разрешения детектора, во временном окне 6-16 нс для песчаника, не содержащего нефти в породе, бурового раствора в пропитанном слое 30% по массе, толщина слоя с буровым раствором 5 см

## 5 Заключение

В данной работе были рассмотрены основные виды взаимодействия нейтронов с веществом. Был изучен метод геофизических исследований под названием нейтронный гамма-каротаж, ключевыми для которого являются реакции упругого, неупругого рассеяния нейтронов, а также их радиационный захват. Было проведено моделирование нейтронного гамма-каротажа для различных пород для случаев наличия в толще воды и нефти, а также для варианта их отсутствия. Из результатов моделирования следует, что отделение нефти от воды методом нейтронного гамма-каротажа возможно. Нефти присущ характерный углеродный пик в области 4200-4500 кэВ, который отсутствует в гамма-спектре воды. Отделение событий из области,

загрязненной буровым раствором возможно сделать по времени пролета нейтрона, рассматривая определенные временные окна, однако это затрудняется временным разрешением детектора. Наличие же энергетического разрешения приводит к тому, что не все гамма-линии сохраняются. Дальнейшее исследование в этой области имеет смысл: улучшая разрешение детектора (как энергетическое, так и временное), можно сохранить большее число гамма-линий, что в свою очередь позволит провести более детальный анализ породы, а также более эффективно отделять породу без примеси бурового раствора.

## Благодарности

Особую благодарность хотелось бы выразить своему научному руководителю Федорову Н. А. за неоценимый вклад в моделирование нейтронного гамма-каротажа и Третьяковой Т. Ю. за внесенные коррективы, советы и поправки, связанные с теоретической частью работы.

## Список литературы

- [1] Pontecorvo B., Neutron well logging new geological method based on nuclear physics, «Oil and Gas Journal», 1941/42, v. 40, № 18.
- [2] Филиппов Е. М., Прикладная ядерная геофизика, М., 1973; Основы импульсного нейтрон-нейтронного каротажа, М., 1965.
- [3] Арцыбашев В. А., Ядерно-геофизическая разведка, М., 1972.
- [4] Сковородников И.Г. Геофизические исследования скважин, издание 3-е, переработанное и дополненное— Екатеринбург: Институт испытаний, 2009.
- [5] Стогов Ю.В. Основы Нейтронной физики, 2008.
- [6] Vladivoj Valkovic 14 MeV Neutrons: Physics and Applications, 2016.
- [7] В.В. Кадилин, Е.В. Рябева, В.Т. Самосадный, Прикладная нейтронная физика, 2011.
- [8] К.Н. Мухин, Экспериментальная ядерная физика, книга 1, часть 2, издание 5-е, переработанное и дополненное 1993.