

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра **ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**научно-исследовательский формат**

Кормушаков Тимур Юрьевич

Тема работы: Мгновенная гамма-спектрометрия для БНЗТ

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

к.ф.-м.н.

снс ИЯФ СО РАН

Сковородин Д. И./.....

«.....».....20...г.

**Научный руководитель**

к.ф.-м. н.,

снс ИЯФ СО РАН

Касатов Д. А./.....

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2023

# Содержание

Введение .....	3
1. Ускорительный источник нейтронов.....	5
1.1. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией .....	5
2. Детектор гамма-излучения .....	7
2.1. Энергетическая калибровка детектора набором ОСГИ.....	12
3. Дозиметрия в БНЗТ .....	14
3.1. Регистрация 478 кэВ.....	15
4. Экспериментальная часть .....	17
4.1. Постановка и геометрия эксперимента .....	17
4.2. Энергетическая калибровка детектора в высокоэнергетическом диапазоне .....	19
5. Результаты .....	23
6. Заключение .....	25
7. Список литературы.....	27

# Введение

Онкология является одним из наиболее распространенных и опасных заболеваний среди людей, которое может поражать любую часть тела и имеет различные формы и типы. Существующие традиционные методы лечения злокачественных опухолей, такие как хирургия, химиотерапия и радиотерапия, имеют много побочных эффектов и не всегда сдерживают развитие болезни.

Больше чем за полвека исследований технология бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) значительно продвинулась и на сегодняшний день является одним из перспективных методов борьбы со злокачественными опухолями [1]. В основе метода лежит ядерная реакция захвата нейтрона изотопом бора-10, который имеет аномально высокое сечение захвата эпитепловых нейтронов по сравнению с другими элементами.

Вследствие поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция с образованием ядра лития и  $\alpha$ -частицы. В 94 % случаев ядро лития рождается в возбужденном состоянии и за время порядка 0,1 пикосекунды испускает гамма-квант энергии 478 кэВ. Имея высокую линейную передачу энергии, ядро лития с энергией 0,84 МэВ и  $\alpha$ -частица с энергией 1,47 МэВ теряют свою энергию в объеме порядка размера одной клетки, тогда как гамма-квант имеет длину пробега порядка 20 см. Таким образом, выделяемая энергия локализуется в области с высокой концентрацией бора, что позволяет селективно уничтожать раковые клетки, минимизируя воздействие на здоровые ткани.

Бор-нейтронозахватная терапия складывается из трех основных составляющих. Во-первых, для терапии нужны нетоксичные борсодержащие вещества, способные селективно аккумулироваться в опухолевой ткани. Во-вторых, необходим источник обеспечивающих высокий поток эпитепловых нейтронов. Разработанный в ИЯФ СО РАН ускорительный источник нейтронов способен производить достаточный для клинических применений

нейтронный поток нужного спектра. В-третьих, важной составляющей БНЗТ является дозиметрия, которая представляет собой контроль дозы облучения, полученной тканями во время проведения терапии. В данной работе в качестве метода дозиметрии предлагается использовать мгновенную гамма-спектрометрию, которая основывается на регистрации гамма-квантов энергии 478 кэВ, которые излучаются вследствие реакции поглощения нейтрона бором.

Целью данной работы была разработка методики дозиметрии посредством регистрации гамма-излучения при взаимодействии борной кислоты с потоком тепловых нейтронов. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: 1) откалибровать гамма-спектрометр, 2) измерить спектр гамма-излучения, выделяемого из образца с бором в ходе облучения нейтронами, 3) установить зависимость скорости счета от концентрации бора в тестовом образце.

# 1. Ускорительный источник нейтронов

Для эффективной терапии необходимы источники нейтронов, способные поддерживать высокий поток нейтронов нужной энергии. Максимальная эффективность захвата нейтронов при глубине залегания опухоли порядка 10 см обеспечивается потоком нейтронов эпитеплогового диапазона энергий (0,5 эВ - 10 кэВ). Реакторные источники, несмотря на то что могут быть использованы для БНЗТ, связаны с рядом технических, экономических и экологических проблем. Более того, получение спектра эпитепловых нейтронов на реакторах составляет дополнительные сложности. На данный момент в основном развитие происходит в направлении ускорительных источников, поскольку они позволяют создавать высокие потоки нейтронов с оптимальным энергетическим спектром. Такие источники производят нейтроны с помощью пучков заряженных частиц, вступающих в реакцию с ядрами со слабосвязанными нейтронами. Некоторые реакции требуют минимальной кинетической энергии частиц. При использовании энергии пучка близкой к пороговой энергии можно получать нейтроны с малой энергией, подходящей для БНЗТ.

## 1.1. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией

На данный момент одним из действующих решений является предложенный и разработанный ИЯФ СО РАН ускорительный источник эпитепловых нейтронов. В 2019 году значение тока протонного пучка достигло 8,7 мА. Такой ток обеспечивает возможность проведения бор-нейтронозахватной терапии [2].

Схема экспериментальной установки для развития БНЗТ в ИЯФ СО РАН представлена на рис.1. Ускорительный источник эпитепловых нейтронов состоит из источника отрицательных ионов водорода, ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, литиевой мишени и системы формирования пучка. Источник отрицательных ионов формирует пучок заряженных частиц,

которые попадают в электростатический ускоритель, состоящий из пяти электродов, расположенных коаксиально на проходном изоляторе. После ускорения до 1 МэВ пучок попадает в обдирочную мишень, представляющую собой охлаждаемую трубку, в которую напускается аргон. Сталкиваясь с атомами газа, отрицательные ионы пучка теряют два электрона и повторно ускоряются, образуя на выходе ускорителя пучок положительных ионов с энергией 2 МэВ и током до 9 мА. Высокоэнергетический пучок транспортируется посредством квадрупольных линз до литиевой мишени, на которой в пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  генерируются нейтроны. Полученные нейтроны замедляются и направляются с помощью системы формирования пучка, которая служит для минимизации сопутствующего гамма-излучения и быстрых нейтронов (на рисунке не указана).

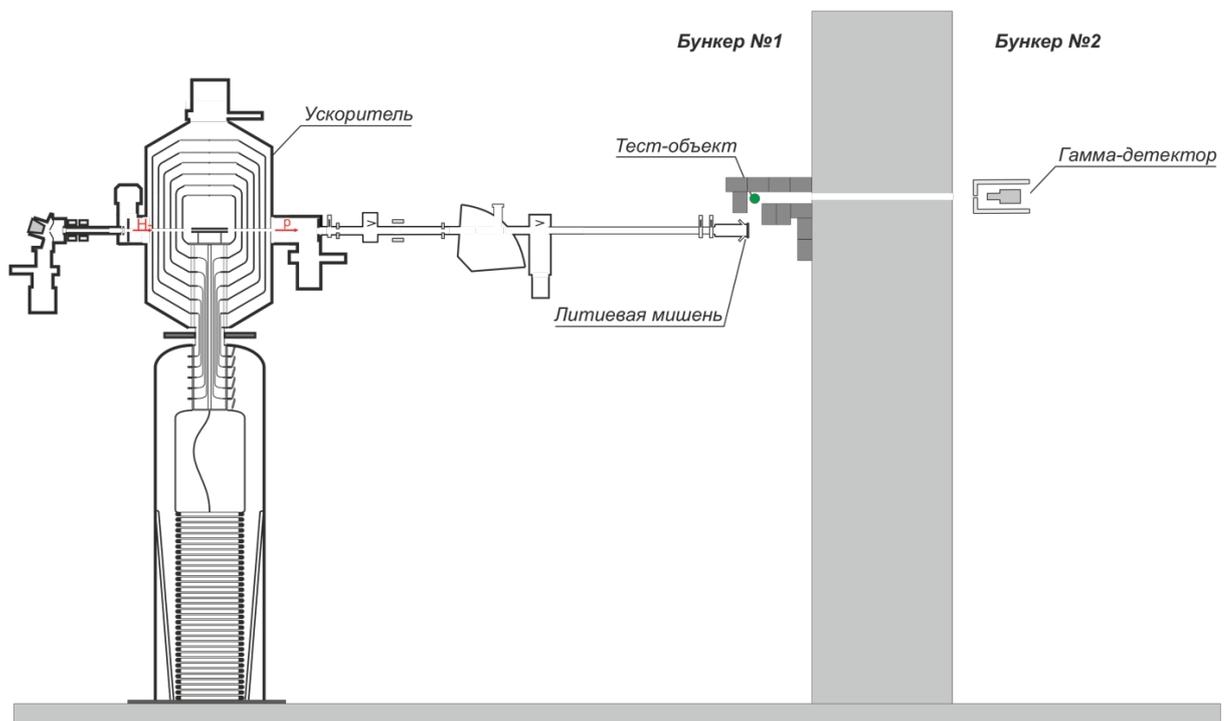
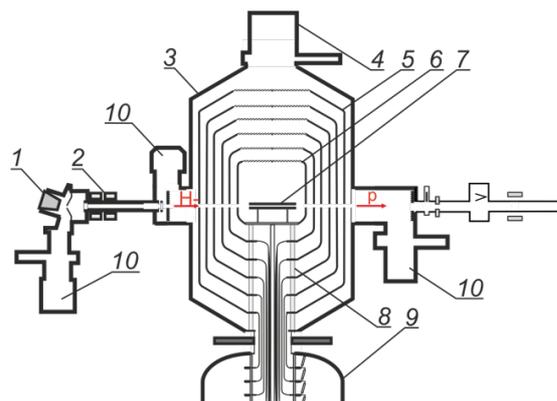


Рис.1 Схема источника нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией



Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией: слева фотография, справа  
схема:

1 – Н источник, 2 – магнитные линзы, 3- ускоритель, 4 – криогенный насос,  
5 – промежуточные электроды, 6 – высоковольтный электрод, 7 – газовая  
обдирочная мишень, 8 – проходной изолятор, 9 – высоковольтный  
источник питания, 10 – турбомолекулярные насосы.

## 2. Детектор гамма-излучения

Полупроводниковый гамма-спектрометр – это устройство, которое использует полупроводниковые материалы для измерения спектра гамма-излучения. Он состоит из детектора на основе особо чистого германия (ОЧГ), представляющий собой обратно включенный рпн-диод, и электронной схемы, которая обрабатывает сигналы, полученные от детектора.

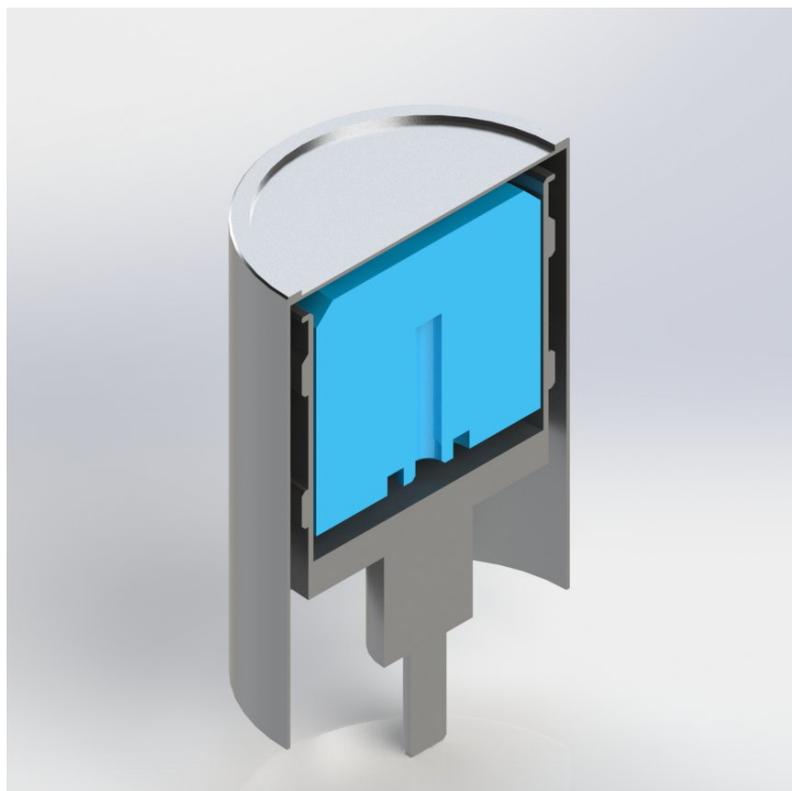


Рис. 2 Схема коаксиального детектора на основе ОЧГ.

Полупроводниковые гамма-спектрометры обладают высоким энергетическим разрешением (порядка 1-2 эВ на всем диапазоне регистрируемых энергий) и чувствительностью, что позволяет обнаруживать даже слабые источники гамма-излучения и анализировать спектры с высокой точностью. Это принципиально важное свойство, вследствие необходимости наблюдать доплеровское уширение линии 478 кэВ а также различать эту линию от присутствующей в фоновом спектре 511 кэВ.

Работа полупроводникового гамма-спектрометра основывается на взаимодействии высокоэнергетических фотонов с полупроводниковым веществом. Гамма-квант, попадая в полупроводниковый детектор, взаимодействует с атомами материала детектора, вызывая появление электрон-дырочных пар в его чувствительной области. Носители зарядов дрейфуют к электродам под воздействием электрического поля, создаваемого приложенным к детектору напряжением. Таким образом, гамма-квант, попадающий в чувствительную область детектора, порождает импульс тока, величина которого пропорциональна энергии регистрируемого фотона.

Генерируемые импульсы поступают на предусилитель, который преобразовывает импульсы тока в импульсы напряжения, с амплитудой пропорциональной величине заряда.

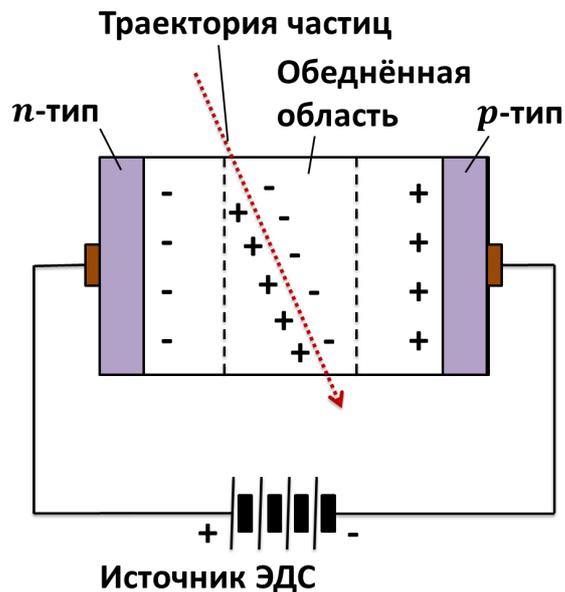


Рис. 3 Схематичное устройство полупроводникового детектора

Попадающий на цифровое спектрометрическое устройство (ЦСУ) сигнал проходит фильтрацию и обрабатывается для определения формы импульсов с целью разделения сигналов от гамма-квантов и сигналов, возникших в результате ионизации среды попавшим в детектор нейтроном. Электронная схема усиливает сигнал и преобразует его в цифровой формат. Анализатор спектра разделяет электрические импульсы по их энергии и формирует спектр гамма-излучения. Спектр представляет собой график зависимости количества гамма-квантов от их энергии. Система сбора данных записывает спектр гамма-излучения и позволяет анализировать его на компьютере.

В данной работе использовался детектор СЕГ-1КП-ИФТП (далее сокр. «спектрометр»), в состав которого входит детектор на основе особо чистого германия и цифровое спектрометрическое устройство ЦСУ-В-1К. Детектор представляет собой Pin-диод цилиндрической формы из кристалла особо чистого германия, диаметром 90 мм и длиной 85 мм.

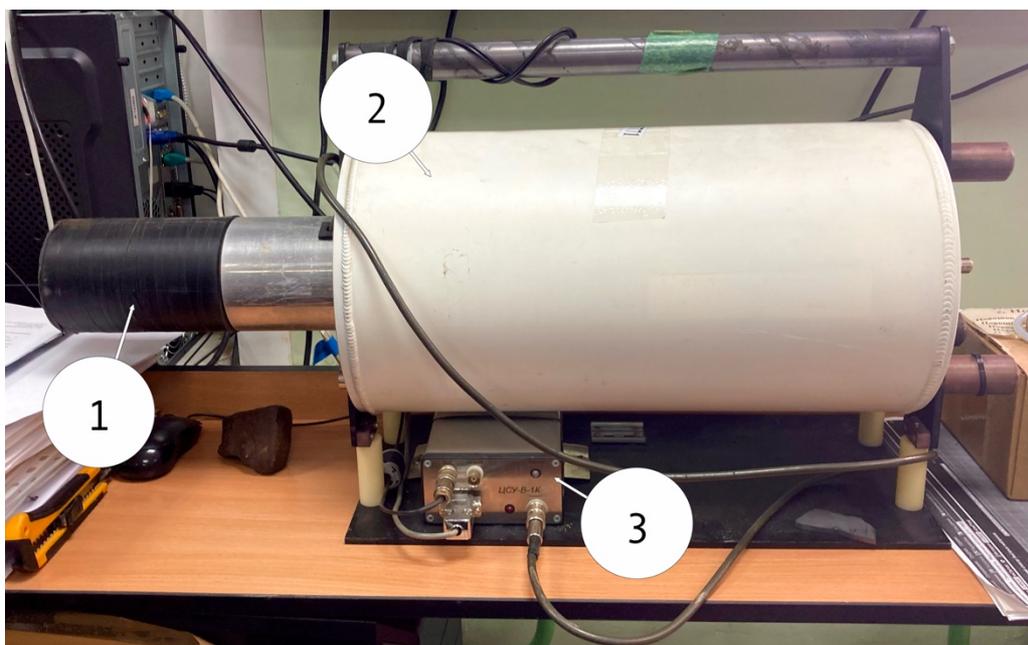


Рис. 4 Спектрометр СЕГ-1КП-ИФТП.

1 – Головной блок, 2 – система охлаждения, 3 – Цифровое спектрометрическое устройство

Детекторы на основе сверхчистого германия характеризуются низким обратным током и высоким энергетическим разрешением. Кроме того, благодаря более высокому атомному номеру материала, сечение взаимодействия германия с гамма-лучами значительно выше, чем у кремния. Однако, в отличие от кремниевых полупроводниковых детекторов, германиевые детекторы должны работать при низких температурах. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны германия намного меньше, чем у кремния (0,66 эВ для германия и 1,09 эВ для кремния) [3]. По этой причине вероятность тепловой генерации неосновных носителей заряда в германии гораздо выше, а токи утечки при комнатной температуре велики. Поэтому головной блок, содержащий детектор и головной каскад предусилителя, размещается в вакуумной полости криостата и охлаждается через хладопровод, опущенный в жидкий азот. Жидкий азот находится в системе охлаждения СО-Е-2К. Блок детектирования с системой охлаждения представляет собой единую конструкцию.

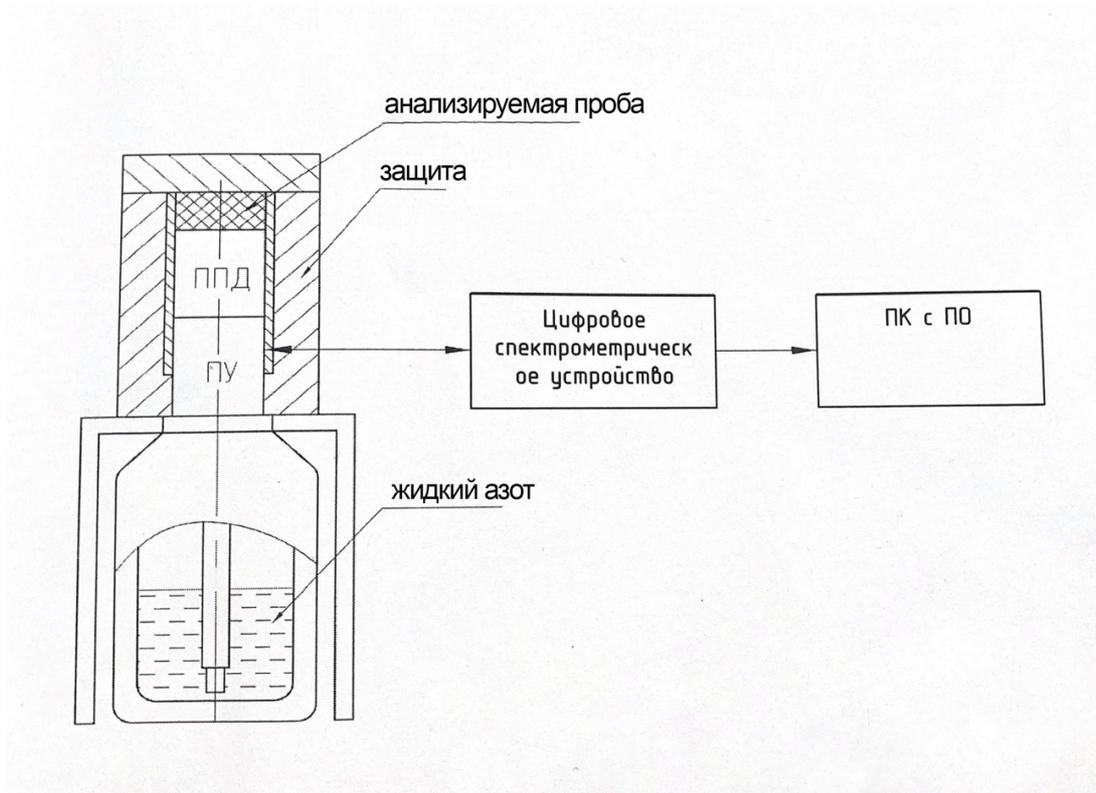


Рис. 5 Функциональная блок-схема спектрометра

Основные технические характеристики блока детектирования и спектрометрического устройства:

1. Энергетический диапазон:  $0,05 \div 10$  МэВ
2. Время непрерывной работы: не менее 24 ч
3. Отношение пик/комpton для энергии: при 1,33 МэВ – 42:1
4. Оптимальная постоянная времени формирования ЦСУ-В-1К: 6 мкс (фронт), 0,5 мкс (плоская вершина)
5. Время нарастания: не более 200 нс
6. Постоянная времени спада: не менее 5 мкс
7. Максимальная входная статистическая нагрузка: не менее  $10^5 \text{ с}^{-1}$

Главная проблема использования полупроводникового гамма-спектрометра для дозиметрии заключается в его низкой нейтроноустойчивости. При высоких потоках нейтронов в материале детектора возникают локальные деформации, приводящие к образованию дислокаций кристалла, замедляющих сбор носителей заряда. Тем самым уменьшается чувствительность и разрешение детектора, в конце концов приводящее к

неработоспособности прибора. Для минимизации нейтронного воздействия на детектор, в данной работе использовалась геометрия эксперимента, позволяющая наблюдать облучаемый нейтронами образец, не подвергая сам детектор высоким нейтронным потокам.

## 2.1. Энергетическая калибровка детектора набором ОСГИ

Для работы с гамма-спектрометром необходимо провести калибровку каналов ЦСУ. Стандартно для калибровки применяются образцовые спектрометрические гамма-источники (ОСГИ), которые производятся в промышленном масштабе и легко доступны. Калибровка по энергии детектора HPGe-спектрометра осуществлена семью эталонными радионуклидными источниками фотонного излучения из набора ОСГИ-РТ [4]:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{207}\text{Bi}$ ,  $^{22}\text{Na}$ .

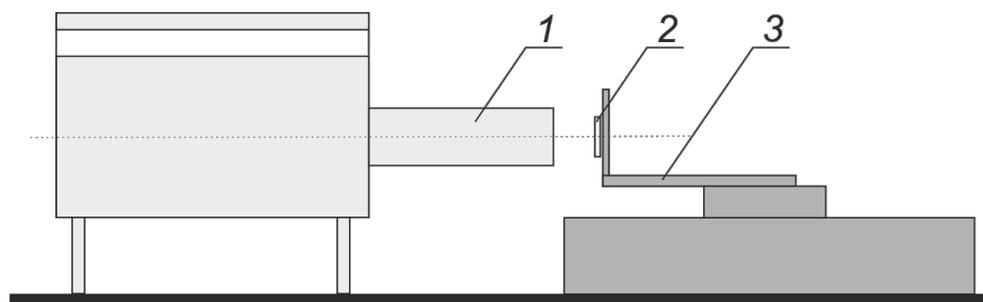


Рис. 6. Схема проведения калибровки: 1 – HPGe-спектрометра, 2 – один из эталонных радионуклидных источников фотонного излучения из набора ОСГИ-РТ, 3 – подвижный управляемый 2D стол с пластиной для закрепления источника фотонного излучения

Для проведения калибровки HPGe-спектрометра (рис. 6) источник фотонного излучения 2 закрепляют на пластине из оргстекла, установленной на подвижном управляемом 2D столе 3, придвигают соосно вплотную ко входному окну детектора 1 (детектор и источники имеют форму цилиндров) и проводят измерения. Измерения проводят для всех семи источников фотонного излучения из набора ОСГИ-РТ [5]. Калибровку детектора по

энергии строят на основе 23 линий  $\gamma$ -излучения; соответствия линии излучения и источника приведены в таблице 1.

Таблица 1. Энергия линий  $\gamma$ -излучения эталонных радионуклидных источников фотонного излучения из набора ОСГИ-РТ.

Источник	Энергия линий $\gamma$ -излучения, кэВ
$^{22}\text{Na}$	1274,530
$^{54}\text{Mn}$	834,848
$^{60}\text{Co}$	1173,237, 1332,501
$^{133}\text{Ba}$	80,997, 276,398, 302,852, 356,000, 383,851,
$^{137}\text{Cs}$	661,657
$^{152}\text{Eu}$	121,781, 244,697, 344,278, 411,116, 778,904, 867,378, 964,079, 1085,869, 1112,074, 1408,006
$^{207}\text{Bi}$	569,702, 1063,662, 1770,237

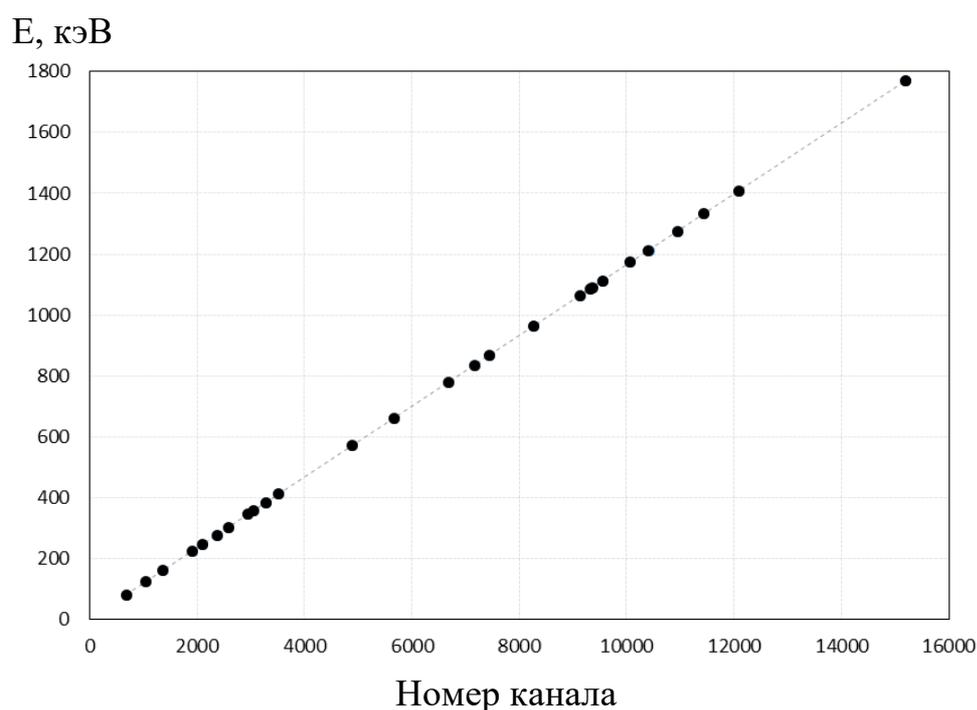


Рис. 7. Зависимость энергии линии  $\gamma$ -излучения от номера канала детектора

Результат калибровки по энергии представлен на рис. 7. Видно, что между каналом измерения и энергией фотонов однозначная линейная зависимость.

### 3. Дозиметрия в БНЗТ

При БНЗТ ткани подвергаются воздействию нейтронов и фотонов с широким энергетическим спектром. При облучении ткани можно выделить четыре отдельных компоненты дозы с различными биологическими эффектами: [6]:

***Доза гамма-излучения  $D_\gamma$ :***

$D_\gamma$  состоит из двух источников гамма-излучения:

а) первичные фотоны от источника нейтронов (реактор, реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  и т.д.) и структур системы формирования пучка.

б) вторичные фотоны от ядерных реакций, происходящих в тканях, в основном за счет захвата тепловых нейтронов водородом в тканях.

***Доза нейтронов  $D_{fast}$ :***

$D_{fast}$  индуцируется в основном быстрыми нейтронами, а также эпитепловыми за счет реакции  ${}^1\text{H}(n,n){}^1\text{H}$  в тканях (также называется водородной дозой или дозой отдачи протонов).

***Доза  $D_N$ :***

Доза  $D_N$  состоит из локально выпавшей дозы от продуктов реакции захвата в основном тепловых нейтронов азотом-14 (протоны и ядра отдачи  ${}^{14}\text{C}$ ).

***Доза  $D_B$ :***

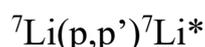
Доза  $D_B$  обусловлена энергией частиц альфа и лития-7 из реакции захвата нейтронов  ${}^{10}\text{B}$ . В 94% реакций  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$  испускаются гамма-квант с энергией 478 кэВ, который обычно используется для анализа распределения  ${}^{10}\text{B}$ .

Дозу от первичных гамма-фотонов, можно измерить прямым путем, а от воздействия тепловых и быстрых нейтронов можно экранироваться защитными слоем и выбором правильной геометрии эксперимента. Борная доза в отличие от остальных компонент контролируется сложнее, так как помимо прочего эффективная доза зависит от предельного накопления препаратов доставщиков бора и облучаемой ткани. Таким образом, измерение борной дозы является важной задачей для дозиметрии в БНЗТ.

### 3.1. Регистрация 478 кэВ

При проведении БНЗТ терапии на ускорительном источнике эпитепловых нейтронов ИЯФ СО РАН присутствует несколько источников излучения гамма-квантов энергии 478 кэВ:

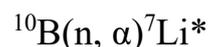
Неупругое рассеяние протонов на литии-7:



Нарабатываемый в литиевой мишени радиоактивный бериллий-7(период полураспада 53,2 дня):



Реакции захвата нейтрона ядром бора-10:



В реакции захвата нейтрона ядром  ${}^{10}\text{B}$ , содержащимся в доставленном в опухоль фармпрепарате, образуется на время порядка пикосекунды возбуждённый изотоп  ${}^{11}\text{B}^*$ , который затем в 94% случаев распадается на возбуждённый изотоп лития  ${}^7\text{Li}^*$  ( $T_{\text{Li}} = 0.84$  МэВ) и  $\alpha$ -частицу ( $T_{\alpha} = 1.47$  МэВ). Время жизни  ${}^7\text{Li}^*$  составляет около 0.1 пикосекунды, после снятия возбуждения рождается стабильный изотоп  ${}^7\text{Li}$  и  $\gamma$ -квант с энергией  $E_{\gamma} = 477,6$  кэВ. Доплеровское уширение гамма линии прямоугольной формы составляет:

$$\pm E_{\gamma} = \sqrt{\frac{2T_{\text{Li}}}{M_{\text{Li}}c^2}} = \pm 7,6 \text{ кэВ}$$

(т.е. энергия излучённого  $\gamma$ -кванта в системе покоя  ${}^{11}\text{B}^*$  равномерно распределена от 470 кэВ до 485,2 кэВ). Уширенный характер линии позволяет идентифицировать излучение от реакции бор-нейтронного захвата, однако также накладывает более строгие требования к энергетическому разрешению гамма-спектрометра.

Таким образом наличие  $\gamma$ -кванта с энергией  $E_{\gamma} = 477.6$  кэВ является маркером бор-нейтронзахватной реакции. Помимо сигнальных  $\gamma$ -квантов с

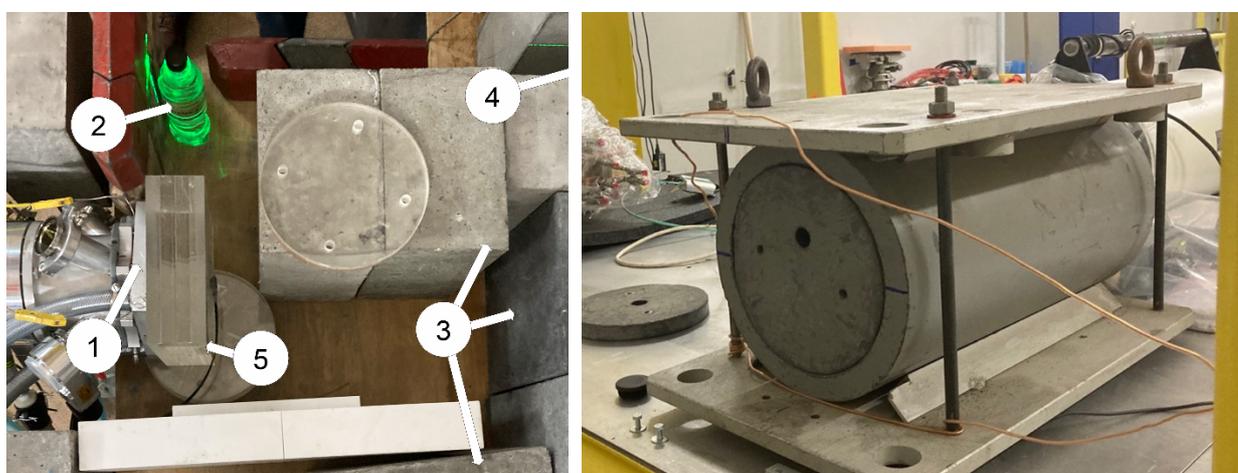
характерной энергией  $E_\gamma = 477.6$  кэВ в БНЗТ будут генерироваться фоновые  $\gamma$ -кванты с энергией  $E_{\gamma\text{bkg}} = 511.0$  кэВ. Кванты данной энергии появляются вследствие аннигиляции электрон-позитронных пар, рождаемых высокоэнергетическими гамма-квантами. Ожидаемая скорость счёта фоновых  $\gamma$ -квантов приблизительно на два порядка превосходит скорость счёта сигнальных  $\gamma$ -квантов.

Для мониторингования процесса БНЗТ и оценки поглощённой дозы в опухоли пациента требуется измерять скорость счёта именно сигнальных  $\gamma$ -квантов. Т.е. счётчик  $\gamma$ -квантов должен существенно различать фоновые ( $E_{\gamma\text{bkg}} = 511.0$  кэВ) и сигнальные ( $E_\gamma = 477.6$  кэВ)  $\gamma$ -кванты. Учитывая различие энергий  $\gamma$ -квантов  $\Delta E = 511 - 477.6 \approx 33$  кэВ и требуемый высокий уровень разделения  $\gamma$ -квантов  $(5 - 6)\sigma$ , получается, что энергетическое разрешение счётчика  $\sigma_E / E$  для энергий  $\gamma$ -квантов около 500 кэВ должно быть  $\lesssim 1\%$ .

## 4. Экспериментальная часть

### 4.1. Постановка и геометрия эксперимента

Экспериментальная установка состоит из источника нейтронов (литиевая мишень и оргстеклянный рассеиватель нейтронов), тест образцов с водным раствором борной кислоты известной концентрации в защитном лабиринте и детектора из особо чистого германия (ОЧГ), помещенного в свинцовый защитный корпус.



а

б

Рис. 8. (а) Часть установки с источником нейтронов: 1-литиевая мишень, 2- образец с борной кислотой, 3-борированные кирпичи, 4-отверстие для наблюдения детектором, 5-рассеиватель нейтронов (б) Детектор из ОЧГ в свинцовой защите

Конструкция источника нейтронов состоит из ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и нейтроногенерирующей литиевой мишени. Наблюдаемые образцы раствором содержатся в пластиковых мерных колбах объемом 50 мл, из материала, не содержащего бора. Детектор представляет собой Pin-диод цилиндрической формы из кристалла особо чистого германия, диаметром 90 мм и длиной 85 мм, размещенный в корпусе с теплоотводом (криостатом), опускаемым в сосуд Дьюара. Детектор расположен в отдельном от нейтроногенерирующей части бункере и отделен от нее бетонной стеной

толщиной 1,5 м с прямым отверстием диаметром 10 см для наблюдения излучения.



Рис. 9. Схема эксперимента: 1 – литиевая нейтроногенерирующая мишень,  
2 – оргстеклянный замедлитель, 3 – образец с бором,  
4 – свинцовая и бетонная защита, 5 – гамма-спектрометр

Разделение детектора от нейтроногенерирующей части обусловлена пагубным влиянием нейтронов на работоспособность детектора. Кроме использования указанной геометрии, для экранирования детектора от нейтронов использовались борированные кирпичи и пластины из литиевого пластика.

Для достаточной интенсивности наблюдаемого сигнала необходимо было выполнить калибровку положения образца по отношению к столу. Измерялась скорость счёта детектора при расположении образца на высоте от нуля до 12 см с шагом четыре сантиметра.

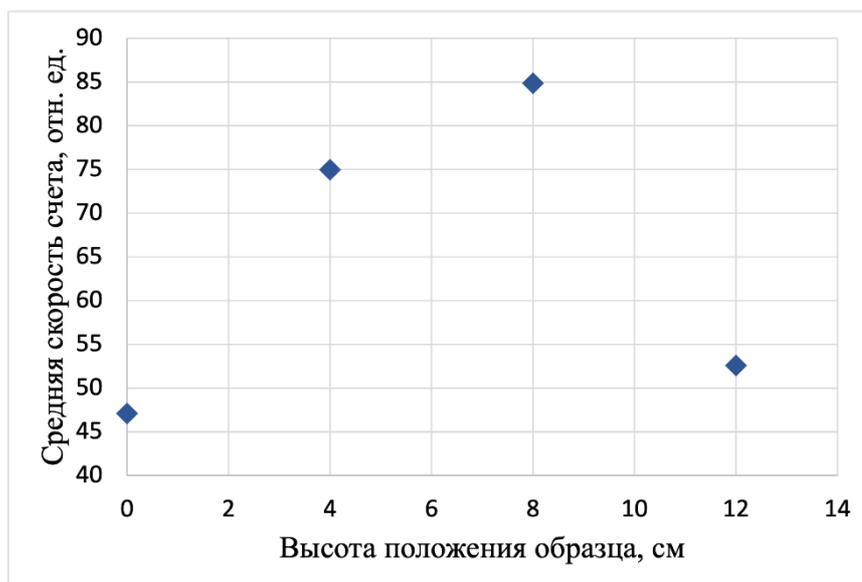


Рис. 10. Зависимость средней скорости счета детектора от высоты расположения образца с бором

В результате оптимальным было выбрано положение на высоте 8 см, где и проводились последующие измерения.

Измерения проводились длительностью в 15 минут на каждый из образцов. Образец представлял из себя пластиковую пробирку объемом 50 мл с водным раствором борной кислоты. Были получены спектры от облученных нейтронами образцов с различной концентраций изотопа  $B^{10}$ : 0, 10, 20, 40, 80, 160 ppm. Для устранения зависимости от различий потока нейтронов, при расчёте концентрации, сигнал детектора был нормирован на среднее значение тока протонов в ускорителе.

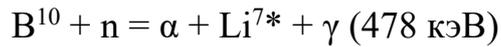
## 4.2. Энергетическая калибровка детектора в высокоэнергетическом диапазоне

После удачно проведенной первой серии экспериментов с использованием HPGE детектора с максимальной энергией регистрации до 2 МэВ, для дальнейших исследований был закуплен аналогичный детектор с максимальной энергией регистрации до 10 МэВ.

Используемые стандартно для калибровки наборы ОСГИ, которые производятся в промышленном масштабе и легко доступны, имеют верхнее

ограничение энергией около 2 МэВ и при калибровке таким набором каналов до 10 МэВ большой диапазон энергий остается без известных образцовых значений. Для решения данной проблемы было предложено использовать излучения известных энергий, испускаемое вследствие ядерных реакций.

Как описывалось ранее, реакция захвата нейтрона бором в 94% случаев приводит к излучению энергии 478 кэВ:



Конструкция источника нейтронов позволяет заменить литиевую мишень на подложки из различных материалов.

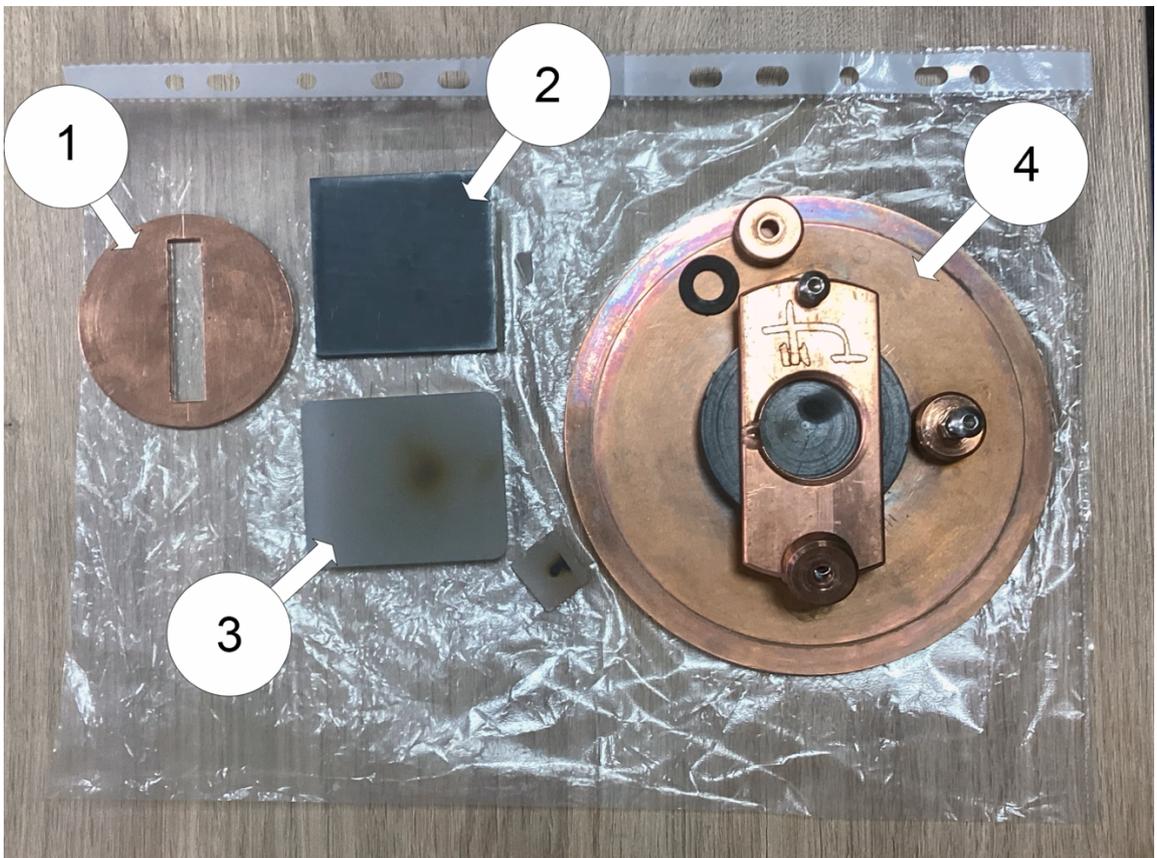


Рис. 11. Используемые подложки. 1 – коллимационная литиевая пластина, 2 – подложка из карбида бора, 3 – подложка из фторида магния, 4 – крепление для подложек к мишенной части источника

Таким образом, установив под ускоренный протонный пучок пластинку фторида магния, можно наблюдать реакцию  $\text{F}^{19} + \text{p} = \text{Ne}^{20*} = \alpha + \text{O}^{16*} + \gamma (6130 \text{ кэВ})$  с испусканием высокоэнергетических гамма-квантов от второго возбужденного состояния ядра кислорода-16.

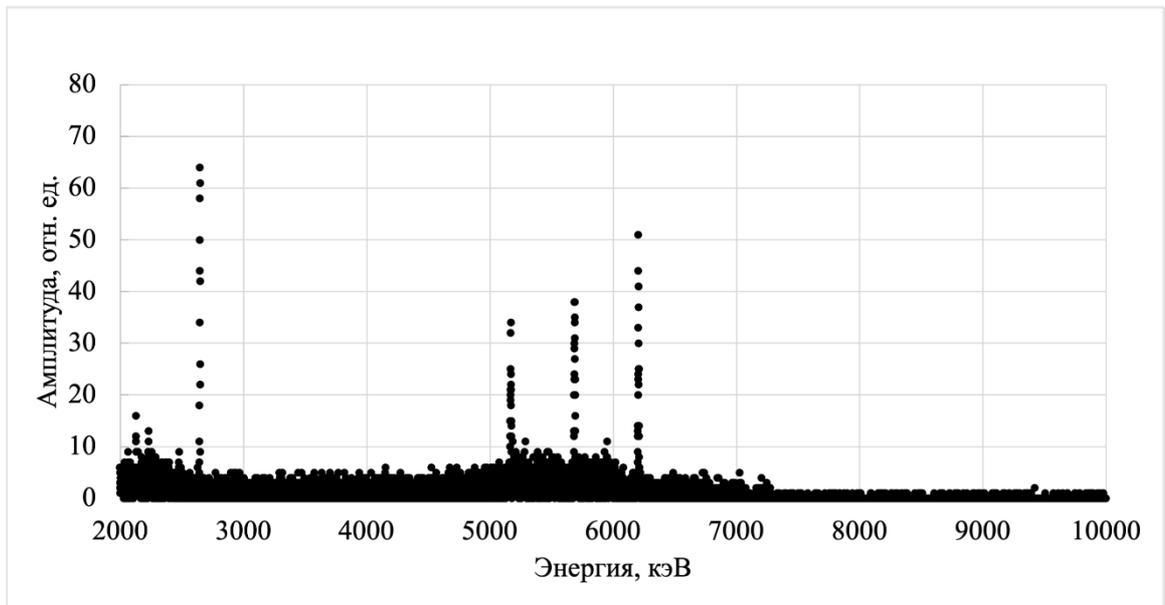


Рис. 12. Спектр излучения пластины  $MgF_2$  при облучении протонами

На спектре помимо основной линии 6130 кэВ видны линии с энергией меньше примерно на 0,5 и на 1 МэВ. Это связано с тем, что для гамма-кванта энергии выше 1022 кэВ возможно образование электрон-позитронной пары в детекторе. Родившиеся позитроны почти мгновенно аннигилируют, порождая два гамма-кванта с энергией 511 кэВ каждый.

$$e^+ + e^- = \gamma (511 \text{ кэВ}) + \gamma (511 \text{ кэВ})$$

Вылет за пределы детектора одного или двух аннигиляционных квантов означает частичную потерю регистрируемой энергии и приводит к тому, что в функция отклика исходного регистрируемого кванта в общем случае имеет два дополнительных пика. Они находятся при меньших чем исходный пик на расстояниях  $m_e c^2$  (511 кэВ) и  $2m_e c^2$  (1022 кэВ) до него. При потере одного аннигиляционного кванта появляется пик одиночного вылета, в случае вылета двух квантов принято говорить о пике двойного вылета.

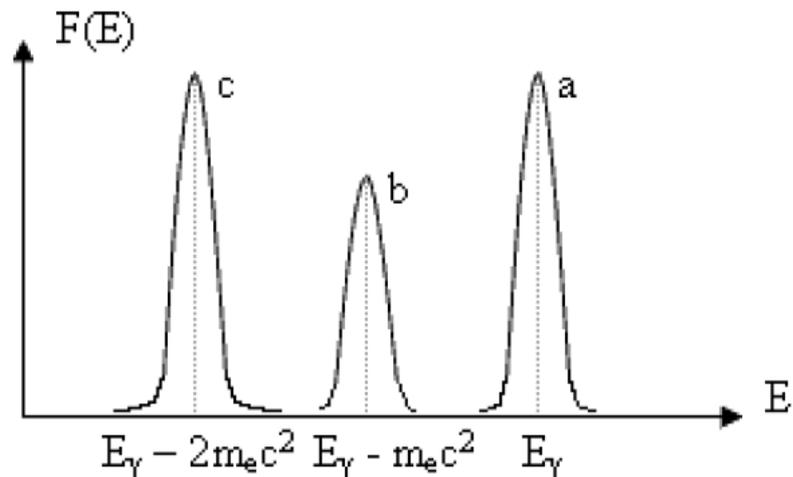
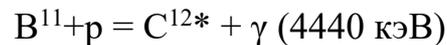


Рис. 13. Эффект рождения  $e^+e^-$  пар с функцией отклика.

При облучении пучком протонов пластинки карбида бора, в соответствие со следующей реакцией получали линию 4440 кэВ:



Аналогичным образом для этой линии наблюдаются две дополнительных линии: 3929 и 3418 кэВ, соответствующие пиками одиночного и двойного вылета.

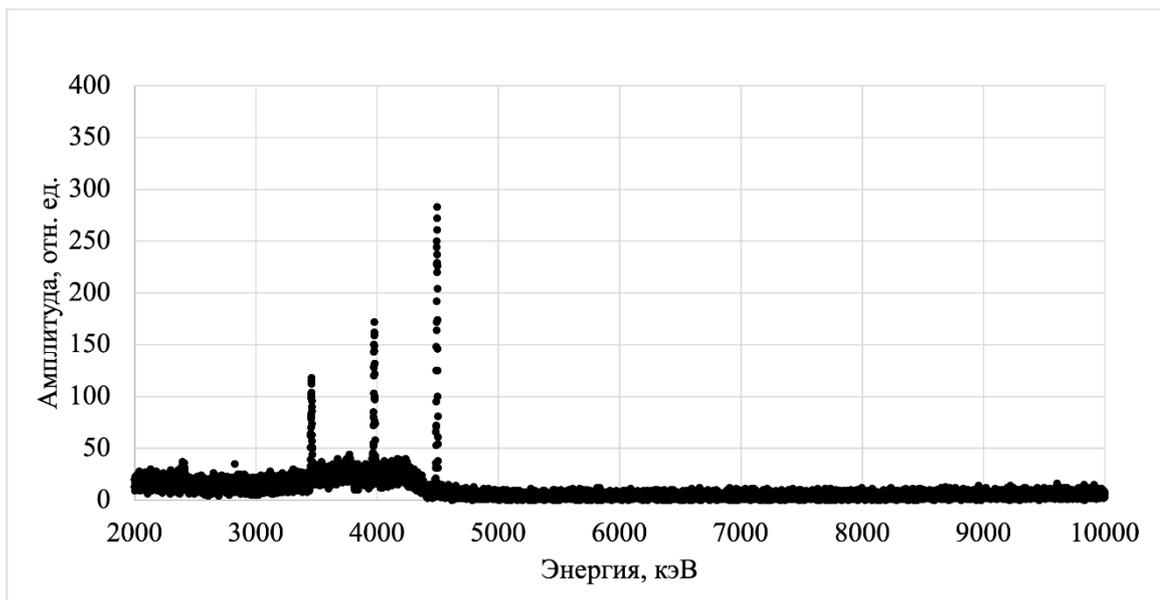


Рис. 14. Спектр излучения пластины  $\text{B}_4\text{N}$  при облучении протонами

Также для калибровки в более диапазоне до 2 МэВ использовались источники из набора ОСГИ:  $\text{Eu}^{152}$  (1408 кэВ),  $\text{Co}^{60}$  (1333 кэВ),  $\text{Cs}^{137}$  (662 кэВ). Был получен набор калибровочных точек, представленный в таблице 2.

Таблица 2. Калибровочные данные

Канал	Образцовая линия, кэВ	Некалиброванное значение, кэВ	Источник линии
10170	6130	6204,57	O <sup>16</sup> (основная линия)
9324	5619	5691,311	O <sup>16</sup> (одиночный вылет)
8474	5108	5172,559	O <sup>16</sup> (двойной вылет)
7363	4440	4492,69	C <sup>12</sup> (основная линия)
6513	3929	3975,769	C <sup>12</sup> (одиночный вылет)
5665	3418	3458,238	C <sup>12</sup> (двойной вылет)
2336	1408	1426,563	Eu <sup>152</sup>
2211	1333	1350,276	Co <sup>60</sup>
1097	662	669,796	Cs <sup>137</sup>
849	511	518,443	e+e-
793	478	485	Li <sup>7*</sup>

На основе собранных калибровочных данных линейной аппроксимацией была проведена калибровка детектора в диапазоне от 50 кэВ до 10 МэВ.

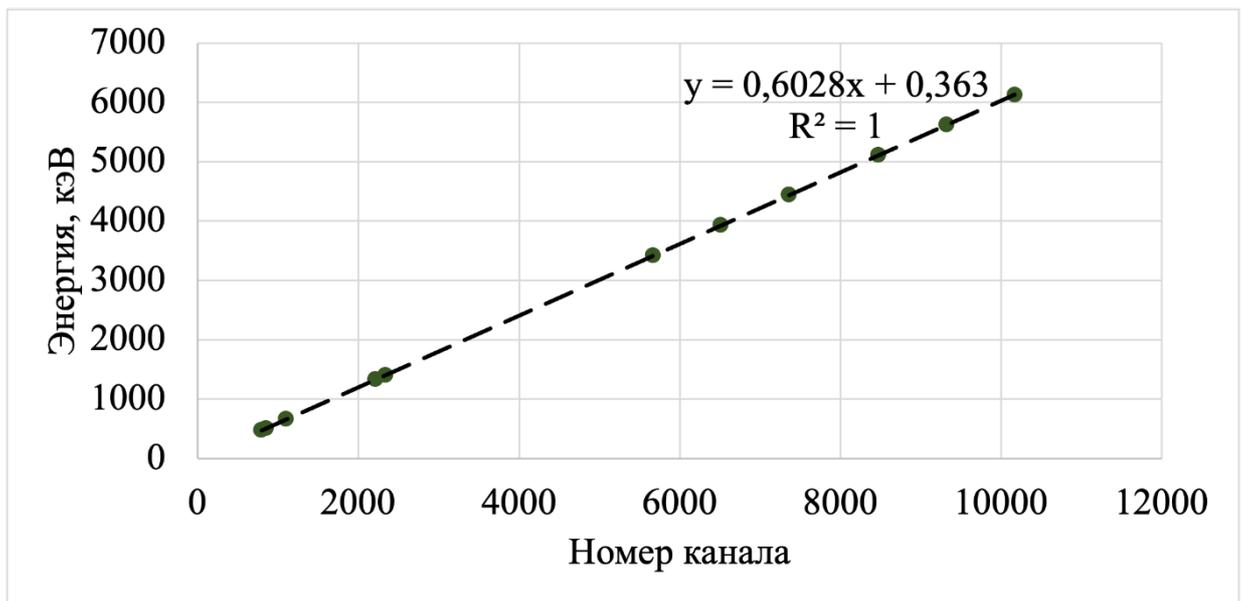


Рис. 15. Энергетическая калибровка

## 5. Результаты

В первой серии экспериментов были получены спектры гамма-излучения до 2 МэВ при различной концентрации борной кислоты.



Рисунок 16. Спектр от образца борной кислоты с содержанием бора 160 ppm.

На графике видно, что линия 478 кэВ хорошо различима от соседней линии 511 кэВ. Дальнейший анализ спектров включал в себя сравнение интенсивностей линии 478 кэВ, которые характеризуются интегралом уширенного пика. На рисунке 17 представлены нормированные на значения среднего тока спектры образцов с различной концентрацией борной кислоты. Различным концентрациям соответствуют разные цвета от фиолетового для 0 ppm до красного для 160 ppm.

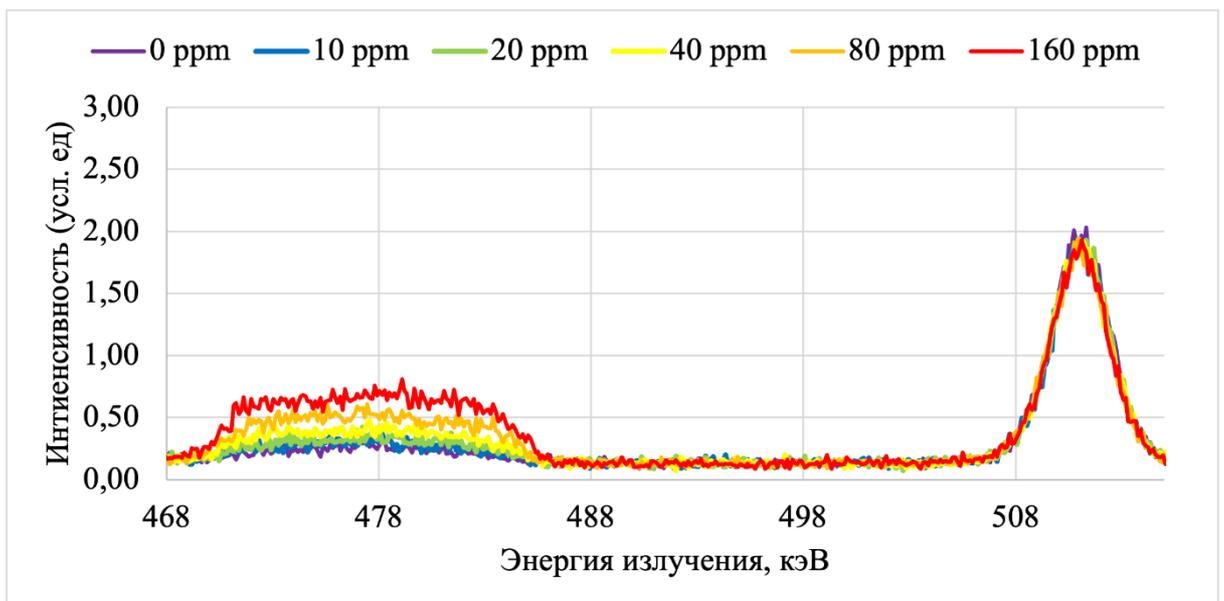


Рис. 17 Спектры при различных концентрациях  $B^{10}$  в образцах

Проинтегрировав сигналы в окрестности от 470 до 488 кэВ, что соответствуют ширине линии с учетом доплеровского уширения главной линии, были получены следующие значения, которые представлены на рисунке 18:

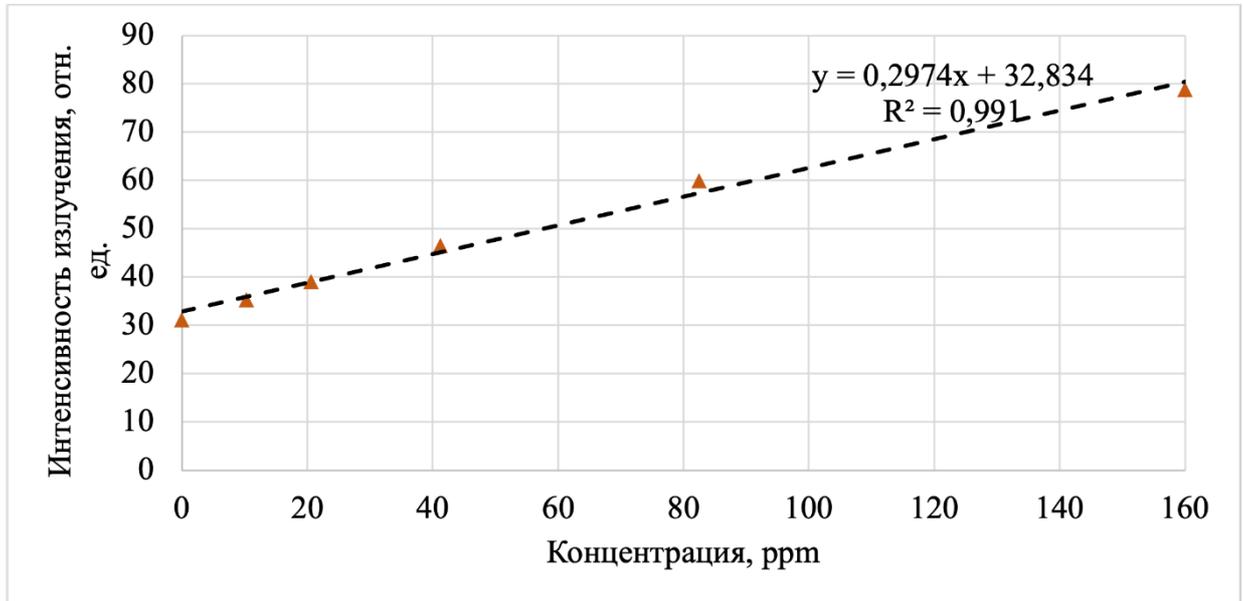


Рис.18 Зависимость интенсивности линии 478 кэВ от концентрации  $B^{10}$  в образце.

Была построена аппроксимирующая прямая, на которую измеренные точки ложатся с коэффициентом детерминации равным 0,985. Полученные результаты позволяют утверждать, что метод мгновенной гамма-спектрометрии способен решать задачу наблюдения бора концентрации от 20 ppm. Для успешного проведения БНЗТ необходимо минимальное накопление 40 ppm бора в опухоли. Следовательно, рассмотренная методика может рассматриваться как перспективный способ дозиметрии.

## 6. Заключение

В ходе работы были проведены меры по развитию методики мгновенной гамма-спектрометрии в рамках задачи о дозиметрии для БНЗТ. На ускорительном источнике эпитепловых нейтронов в Институте ядерной физики СО РАН проведена калибровка гамма-спектрометра с использованием

стандартного набора ОСГИ и высокоэнергетических линий, излучаемых при взаимодействии различных материалов с пучком протонов.

Проведен ряд экспериментов, посвященных визуализации бора путем анализа спектров излучения борсодержащих образцов, облучаемых нейтронным потоком. Реализована геометрия эксперимента, позволяющая наблюдать излучение образцов, при этом экранируя детектор от разрушительного нейтронного потока.

Были получены спектры с явно различимой линией 478 кэВ, у которой наблюдается предсказанное доплеровское уширение. Была установлена линейная зависимость интенсивности излучения от концентрации изотопов бора-10. Установлено, что полупроводниковый детектор на основе высокочистого германия применим для измерения борной дозы в БНЗТ.

## 7. Список литературы

- [1] Таскаев С.Ю. Бор-нейтронозахватная терапия злокачественных опухолей: основы, история и текущее состояние. Онкологический журнал. – Т.2. – Новосибирск, 2019. – С. 66-83.
- [2] Таскаев С. Ю. Ускорительный источник тепловых нейтронов – Новосибирск: Дисс. докт. физ. -мат. наук. 2014. 295 с.
- [3] Иванов В.И., Аксенов А.И., Юшин А.М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 448 с.
- [4] Бикчурина М. И. Измерение спектра и потока нейтронов ускорительного источника нейтронов ИЯФ СО РАН, 2021
- [5] Evaluated Nuclear Data File: [Электронный ресурс]. Database Version of 2022-10-07. URL: <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>. (Дата обращения: 21.12.2021).
- [6] Hiroaki Kumada, Kenta Takada. Treatment planning system and patient positioning for boron neutron capture therapy. Therapeutic Radiology and Oncology, 2018.