

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 539.1.07

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КСЕНОНОВОГО
ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА В БОР-НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ
ТЕРАПИИ НА МЕДИЦИНСКОМ ПУЧКЕ РЕАКТОРА
ИРТ НИЯУ МИФИ

И. Ф. Химматов¹, С. Е. Улин², В. М. Грачев², К. Ф. Власик²,
З. М. Утешев², А. Е. Шустов², А. И. Маджидов²

В работе рассматривается возможность применения ксенонового гамма-спектрометра (КГС) для определения дозовой нагрузки на пациента в процессе бор-нейтрон-захватной терапии (БНЗТ) на исследовательском реакторе ИРТ НИЯУ МИФИ. Обсуждается возможность использования полупроводниковых гамма-спектрометров при проведении нейтрон-захватной терапии (НЗТ). Приведены результаты калибровки и тестирования измерительного комплекса дистанционного управления КГС. Выполнены модельные эксперименты для изучения спектрометрических характеристик измерительного комплекса эксперимента “КСЕНОН”. Получена зависимость поглощенной дозы от концентрации раствора в мишени (водный раствор борной кислоты) при облучении её тепловыми нейтронами с плотностью потока в диапазоне от $3.3 \cdot 10^5$ до $7.87 \cdot 10^8$ нейтрон/(см²·с). Результаты экспериментов подтвердили целесообразность использования КГС для контроля дозовой нагрузки на пациента в процессе проведения БНЗТ.

Ключевые слова: нейтрон-захватная терапия, реактор, гамма-спектрометр, радиационная стойкость, ксеноновый гамма-спектрометр, гамма-кванты, нейтроны.

¹ Самаркандский государственный университет им. Ш. Рашидова, Узбекистан; e-mail: islombekhimmatov24@gmail.com.

² НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

Введение. Бор-нейтрон-захватная терапия (БНЗТ) представляет собой один из методов лечения злокачественных образований, основанный на взаимодействии изотопа ^{10}B с тепловыми нейтронами. Изотоп ^{10}B захватывается онкологическими клетками при приёме соответствующих препаратов. В результате захвата нейтронов происходит ядерная реакция с образованием альфа-частицы ^4_2He и ядер лития ^7_3Li , которые оказывают сильное ионизирующее воздействие на опухолевые клетки, в результате чего они погибают [1]. Возбужденное ядро ^7Li испускает гамма-квант с энергией 478 кэВ, регистрируемый ксеноновым гамма-спектрометром (КГС).

Одной из ключевых задач БНЗТ является измерение поглощенной дозы, получаемой пациентом во время терапии. Это необходимо для эффективного лечения и обеспечения безопасности пациента.

Радиационная стойкость КГС по отношению к потоку тепловых нейтронов проверялась в экспериментах с использованием изотропного Pu-Be источника нейтронов и нейтронного генератора ИНГ-07 [2]. Гамма-спектрометрические характеристики ксенонового гамма-спектрометра остаются неизменными при прямом воздействии нейтронного излучения от Pu-Be источника и генератора нейтронов ИНГ-07 (флюенс составил $2.2 \cdot 10^9$ нейтронов и $1.08 \cdot 10^8$ нейтронов, соответственно). Использование ксенонового гамма-спектрометра в процессе проведения БНЗТ может обеспечить определение величины поглощенной дозы, получаемой пациентом.

Несмотря на хорошее энергетическое разрешение, применение полупроводниковых гамма-спектрометров на основе сверхчистого германия Ge(Li) в НЗТ оказалось достаточно сложным по ряду причин. Во-первых, для функционирования таких гамма-спектрометров необходимо охлаждение до криогенных температур, что существенно усложняет их применение. Во-вторых, для гамма-спектрометров (Ge(Li)) необходима специальная защита от рассеянного нейтронного излучения. Кроме того, требуется закрывать их свинцом от влияния фоновых потоков гамма-излучения. Важно отметить, что без надёжной защиты от нейтронов гамма-спектрометр не может работать стабильно в течение длительного времени. Под действием нейтронного облучения разрушается кристаллическая решетка этих гамма-детекторов Ge(Li), что приводит к деградации их характеристик и искажению экспериментальных данных [3].

После оптимизации медицинского нейтронного пучка ГЭК-4 на ИРТ НИЯУ МИФИ был получен поток тепловых нейтронов с плотностью $7.87 \cdot 10^8$ нейтрон/(см²·с). Доля в потоках промежуточных и быстрых нейтронов по отношению к тепловым нейтронам составила 0.414 и 0.088, соответственно, [4].

В статье рассматривается возможность применения КГС при проведении БНЗТ на медицинском пучке нейтронов ИРТ НИЯУ МИФИ и приводятся результаты расчетного эксперимента “КСЕНОН”. Настоящая работа является важным шагом на пути к совершенствованию методов дозиметрии в БНЗТ, что открывает новые перспективы для контроля величины поглощенной дозы, которую могут получить пациенты в процессе лечения онкологических заболеваний.

Схема эксперимента “КСЕНОН”. Схема эксперимента “КСЕНОН”, подготовленного на медицинском пучке ИРТ НИЯУ МИФИ, представлена на рис. 1. В качестве мишени использовался водный раствор борной кислоты, помещенный в тонкостенный полиэтиленовый сосуд. На выходе нейтронного канала установлен коллиматор из кадмия (2 мм) и свинца (5 см), формирующий отверстие размером 3×3 см².

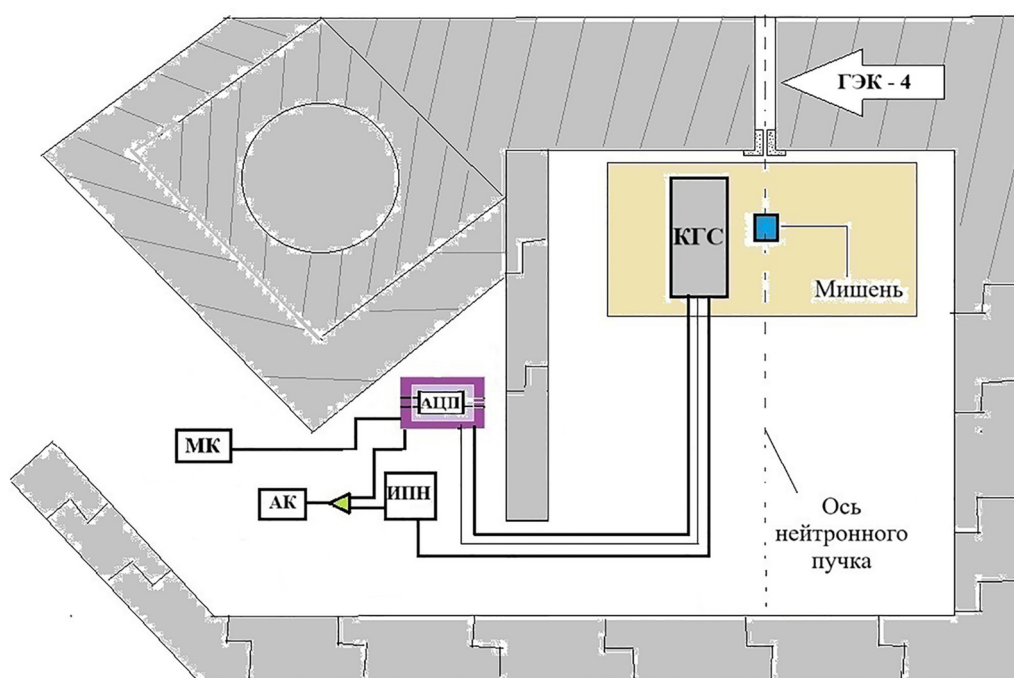


Рис. 1: Схема эксперимента “КСЕНОН” на медицинском пучке ГЭК-4 ИРТ НИЯУ МИФИ.

Ксеноновый гамма-спектрометр (КГС) размещается на расстоянии 40 см сбоку от мишени (рис. 1). КГС представляет собой импульсную ионизационную цилиндрическую камеру с экранирующей сеткой. Рабочим веществом КГС является сжатый ксенон (^{54}Xe) с давлением ~ 40 атм. Для повышения подвижности электронов в рабочую среду добавлен небольшой объем (0.3%) водорода (H_2). Гамма-спектрометр обладает энер-

гетическим разрешением $1.7 \pm 0.3\%$ для гамма-линии с энергией 662 кэВ (γ -излучение ^{137}Cs) и имеет рабочий энергетический диапазон 0.05–5 МэВ [5, 6].

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП), необходимый для оцифровки и обработки электрических сигналов от гамма-спектрометра, был размещён на расстоянии 3 м от гамма-спектрометра и закрыт экраном из кадмия и свинца для защиты от рассеянного гамма- и нейтронного излучения.

Электропитание КГС осуществляется с помощью источника постоянного напряжения (ИПН). Для автоматизации процесса к гамма-спектрометру подключен микрокомпьютер (МК), который предназначен для управления, сбора, временного хранения и передачи информации оператору, располагающемуся на безопасном расстоянии от реактора. Блоки АЦП, ИПН и МК питаются от аккумулятора (АК) (рис. 1).

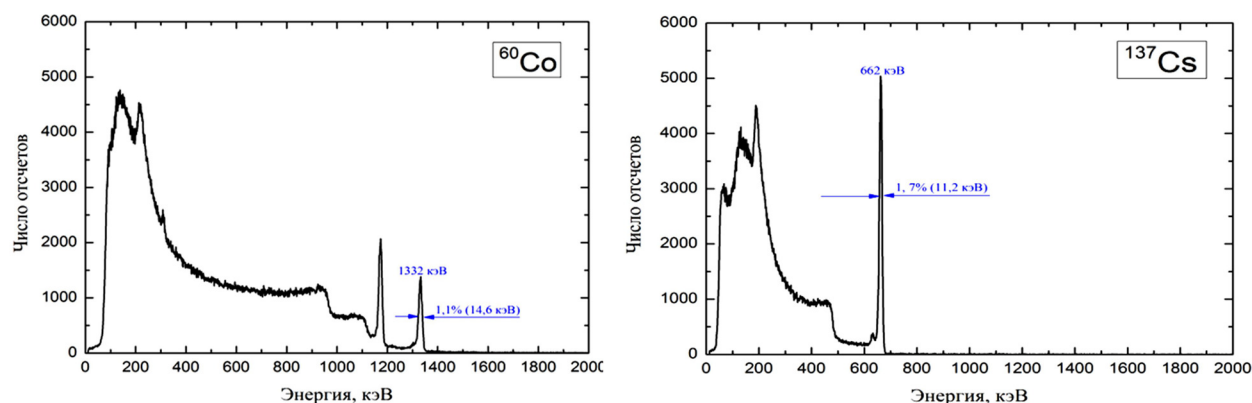


Рис. 2: Спектры гамма-источников ^{60}Co и ^{137}Cs , измеренных ксеноновым гамма-спектрометром.

Калибровка измерительного комплекса. Детальная калибровка КГС была проведена в радиационной лаборатории НИЯУ МИФИ. Для калибровки использовались стандартные гамма-источники из набора ОСГИ ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba и ^{22}Na . Источники располагались на расстоянии 40 см от центральной оси гамма-спектрометра. В качестве примера на рис. 2 приведены спектры гамма-источников ^{60}Co и ^{137}Cs .

Проведены испытания измерительного комплекса в дистанционном режиме. При этом были получены фоновые гамма-спектры в помещении, где находилась аппаратура эксперимента “КСЕНОН”. Подготовлена и успешно протестирована система удалённой связи, передачи и приёма данных от гамма-спектрометрического комплекса [7]. Для управления, сбора, временного хранения и передачи гамма-спектров, полученных с помощью КГС, разработано программное обеспечение “SpectrumControl”. Для разработки

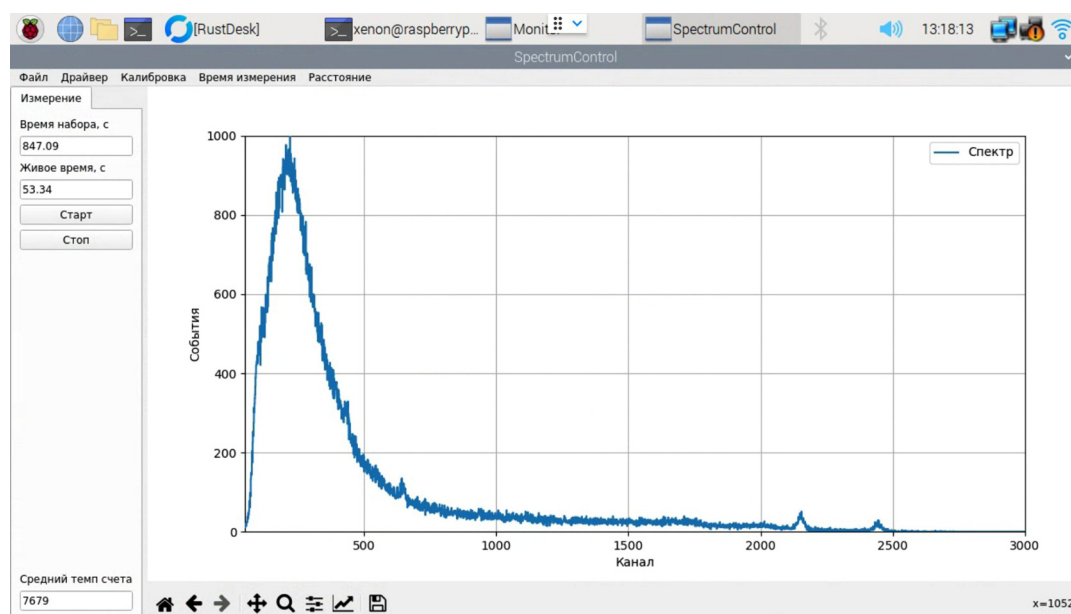


Рис. 3: Интерфейс рабочего окна программного обеспечения “SpectrumControl”.

программного обеспечения использовался язык программирования Python. На рис. 3 представлен интерфейс рабочего окна программного обеспечения “SpectrumControl”, разработанного для выполнения следующих функций: накопления данных с блока АЦП, запись полученных спектров в файл, визуализация энергетического спектра для контроля за работой КГС. Кроме того, программное обеспечение обрабатывает спектры во время измерения, определяет поглощённую дозу и подаёт сигнал для остановки потока нейтронов, когда поглощенная доза достигает определенной величины (напр., 2 Гр). Эта величина соответствует максимальной дозовой нагрузке, которую пациент может получить за один сеанс БНЗТ.

Для тестирования спектрометрического оборудования эксперимента “КСЕНОН” и системы удалённой связи, передачи и приёма данных проводились фоновые измерения в рабочем помещении на ГЭК-4. Типичный фоновый гамма-спектр показан на рис. 3.

В фоновом гамма-спектре наблюдается небольшое количество пиков с энергиями 1173 кэВ и 1332 кэВ, соответствующих изотопу ^{60}Co (период полураспада 5.2714 лет), который образуется при взаимодействии нейтронов с конструктивными элементами, содержащими ядра железа.

Моделирование эксперимента “КСЕНОН”. На первом этапе проведено моделирование процесса регистрации гамма-квантов с помощью ксенонового гамма-спектрометра. Оно проводилось с использованием пакета программ GEANT4. Для проверки адекват-

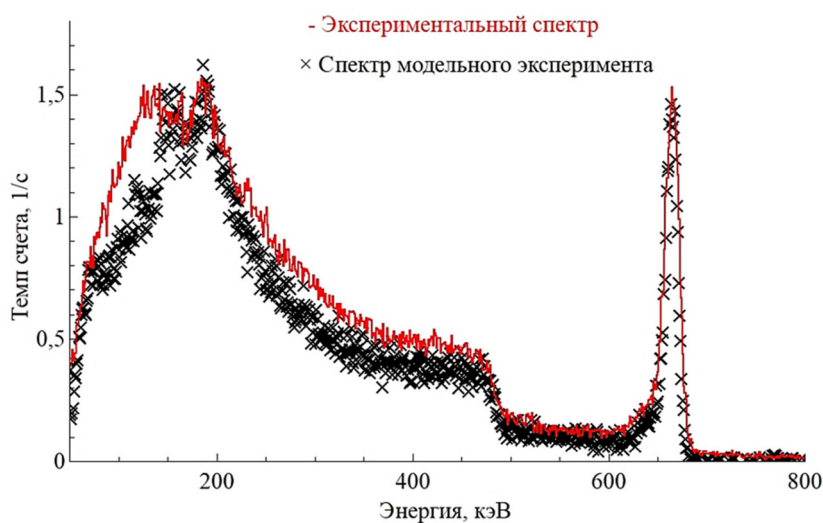


Рис. 4: Спектры ^{137}Cs , полученные при проведении модельного (расчетного) и реального экспериментов с использованием КГС.

ности результатов модельного эксперимента проводилось сравнение двух спектров от гамма-источника ^{137}Cs , полученные в ходе модельного эксперимента, и спектра, измеренного с помощью реального ксенонового гамма-спектрометра. На рис. 4 представлены модельный (расчетный) и измеренный прибором (экспериментальный) спектры радиоизотопа ^{137}Cs .

Спектры, полученные с помощью программы GEANT4 и измеренные ксеноновым гамма-спектрометром, хорошо согласуются друг с другом.

На втором этапе проведено моделирование следующего процесса: пучок тепловых нейтронов с плотностью $7.87 \cdot 10^8$ нейтрон/ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ падает на мишень с объемом 75.36 см^3 , состоящую из водного раствора борной кислоты с концентрацией ^{10}B 2 мкг/мл. В результате поглощения нейтрона ядром ^{10}B образуется ядро ^{11}B , которое распадается на ядро ^7Li и α -частицу. В 94% случаев возбужденное ядро ^7Li испускает гамма-квант с энергией 478 кэВ. Эти гамма-кванты регистрируются с помощью ксенонового гамма-спектрометра.

На рис. 5 представлен гамма-спектр (расчетный), полученный с помощью модельного эксперимента при облучении мишени. Время экспозиции составило 900 с.

На рис. 5 отчетливо видны характерные пики 536, 630 и 668 кэВ, образующиеся в результате нейтронного облучения изотопов ксенона ^{129}Xe , ^{131}Xe , присутствующих в рабочем веществе детектора.

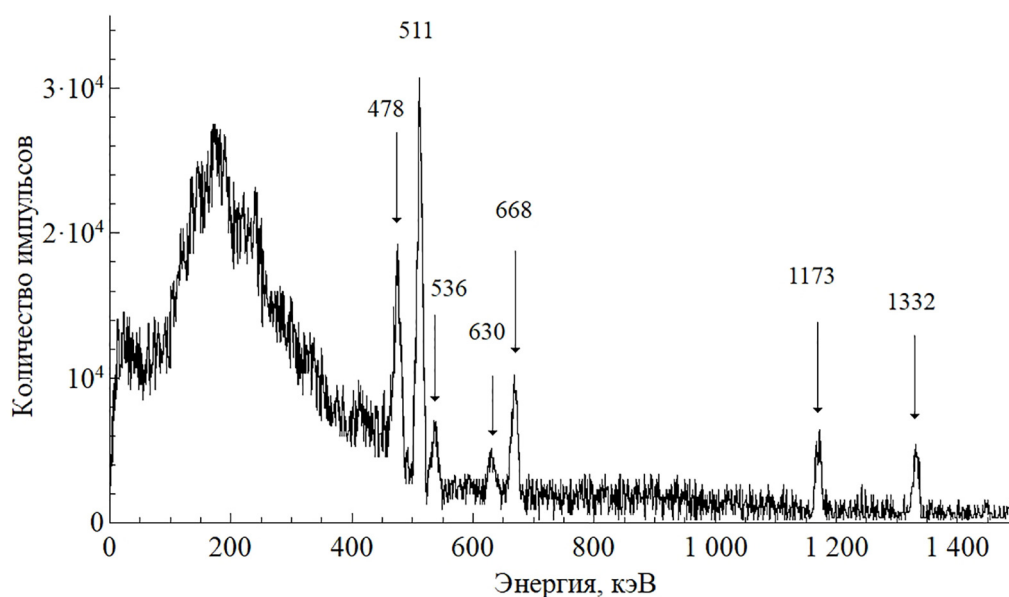


Рис. 5: Гамма-спектр (расчетный) при облучении мишени (раствор борной кислоты с концентрацией ^{10}B 2 мкг/мл) тепловыми нейтронами.

Кроме этого наблюдается пик гамма-квантов с энергией 478 кэВ, соответствующий излучению возбужденного лития (с вероятностью 94%), который образуется в результате ядерной реакции теплового нейтрона с ядром изотопа ^{10}B . Из рис. 5 видно, что гамма-линии 478 кэВ и 511 кэВ хорошо разделяются благодаря высокому энергетическому разрешению КГС.

На рис. 6 показан фоновый гамма-спектр (расчетный), полученный в результате облучения мишени (дистиллированная вода). В этом спектре нет гамма-линии с энергией 478 кэВ, поскольку в мишени отсутствует изотоп ^{10}B . Кроме того, в спектре наблюдается слабый пик с энергией 483 кэВ, возникающий при взаимодействии нейтронов с ^{131}Xe . Вероятность этого взаимодействия составляет 8.21%. Время экспозиции составило 900 с.

Этот фоновый спектр будет учитываться при обработке гамма-спектров, получаемых при облучении борсодержащих мишеней.

Результаты обработки гамма-спектра (расчетный) с учетом фона показан на рис. 7.

После вычитания фона отчетливо виден пик для энергии гамма-квантов 478 кэВ.

На основании результатов, полученных с помощью модельных экспериментов, проведена оценка поглощенной дозы в борсодержащих мишенях. На рис. 8 показана зависимость поглощенной дозы от концентрации ^{10}B в мишени (расчетный).

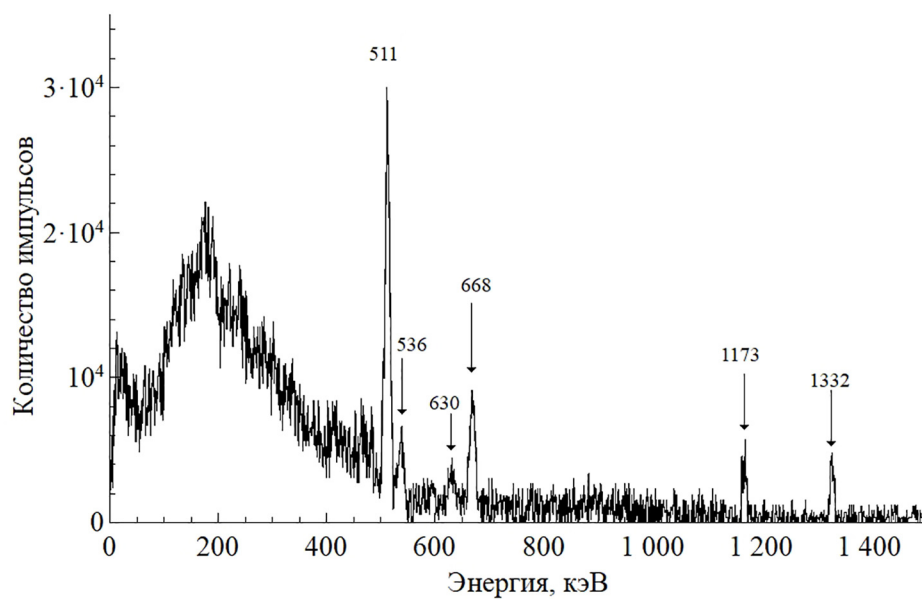


Рис. 6: Фоновый гамма-спектр (расчетный).

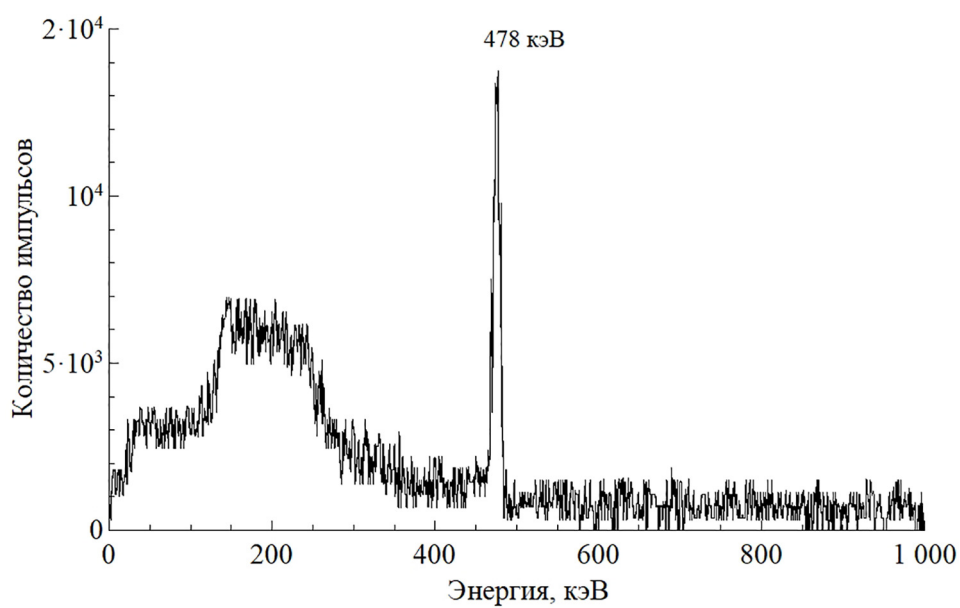


Рис. 7: Гамма-спектр (расчетный) с учетом фона.

Результаты исследований подтвердили, что с увеличением концентрации борной кислоты растёт и поглощённая доза. Полученные данные модельного эксперимента показали возможность использования КГС для дозиметрического контроля в процессе проведения БНЗТ.

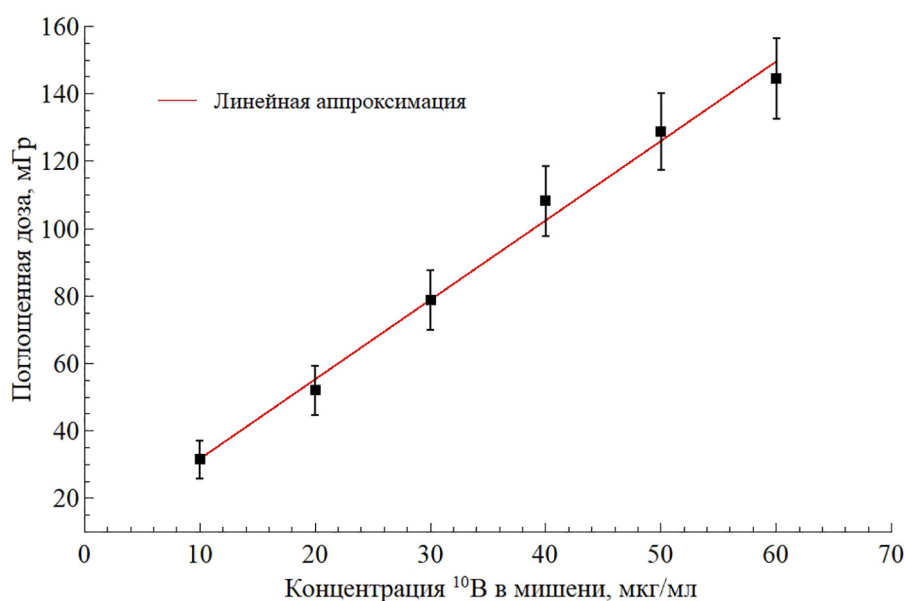


Рис. 8: Зависимость поглощенной дозы от концентрации ^{10}B (расчетный).

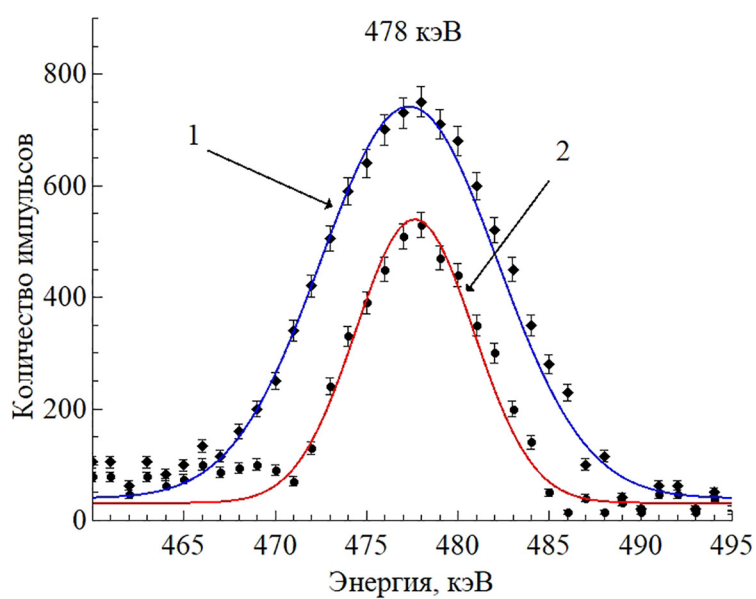


Рис. 9: Спектры, полученные с помощью ксенонового (1) (расчетный) и полупроводникового (2) (экспериментальный) гамма-спектрометров.

Сравнение результатов, полученных с помощью полупроводникового и ксенонового гамма-спектрометров. На рис. 9 представлены результаты сравнения двух экспериментов (расчетный и экспериментальный). Первый является результатом проведе-

ния модельного эксперимента (расчетный), в котором для регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ применялся ксеноновый гамма-спектрометр с объемом 1800 см³ и эффективностью регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ ~3.21%.

Второй был проведен экспериментально на медицинском пучке ГЭК-4 ИРТ НИЯУ МИФИ. Плотность потока нейтронов составила $3.3 \cdot 10^5$ нейтрон/(см²·с). В качестве мишени использовался водный раствор борной кислоты с концентрацией 2 мкг/мл и объемом 75.36 см³. Время облучения – 600 с. Гамма-кванты с энергией 478 кэВ регистрировались с помощью полупроводникового гамма-спектрометра Ge(Li) объемом 75 см³. Эффективность регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ этого прибора составляет ~37.5% [3]. Параметры мишени и плотность потока нейтронов в первом (расчетный) и втором (экспериментальный) экспериментах были одинаковые.

Оценка результатов этих экспериментов показывает, что ксеноновый гамма-спектрометр обеспечивает регистрацию гамма-квантов с энергией 478 кэВ примерно в 2 раза лучше чем Ge(Li).

Заключение. Исследовательский реактор ИРТ НИЯУ МИФИ обеспечивает генерацию тепловых нейтронов с плотностью потока от $3.3 \cdot 10^5$ до $7.87 \cdot 10^8$ нейтрон/(см²·с) на медицинском пучке ГЭК-4 для проведения экспериментов для БНЗТ. Применение полупроводниковых гамма-спектрометров в БНЗТ ограничено из-за необходимости криогенного охлаждения и сложностей с защитой от гамма-нейтронного излучения. Эти факторы снижают возможность их применения, несмотря на высокое энергетическое разрешение Ge(Li) гамма-спектрометров.

Созданный измерительный комплекс эксперимента “КСЕНОН” и разработанный метод измерения дозовых нагрузок на пациента можно рассматривать, как перспективный подход к решению задач БНЗТ. Благодаря большому рабочему объему КГС обеспечивает регистрацию гамма-квантов с энергией 478 кэВ примерно в 2 раза больше, чем полупроводниковый детектор Ge(Li).

В настоящее время реактор ИРТ НИЯУ МИФИ находится в режиме подготовки к проведению различных научных экспериментов. В связи с этим были проведены модельные эксперименты для определения перспектив использования аппаратуры “КСЕНОН” для БНЗТ. Проведение второго этапа эксперимента “КСЕНОН” на исследовательском реакторе ИРТ НИЯУ МИФИ планируется в 2026 году.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] И. Ф. Химматов, С. Е. Улин, Ядерная физика **87**(05), 59 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1063778824700601>.

- [2] И. Ф. Химматов, С. Е. Улин, Краткие сообщения по физике ФИАН **52**(4), 49 (2025). <https://doi.org/10.3103/S1068335624602097>.
- [3] V. F. Khokhlov, K. N. Zaitsev, V. N. Beliyev, et al., Applied Radiation and Isotopes **67**(7-8S), S251 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.03.082>.
- [4] К. Н. Зайцев, В. А. Камнев, В. К. Сахаров и др., Ядерная физика и инжиниринг **3**(3), 224 (2012).
- [5] В. В. Дмитренко, К. Ф. Власик, В. М. Грачев и др., Приборы и техника эксперимента **55**(4), 3 (2012). <https://doi.org/10.1134/S0020441212030104>.
- [6] А. Е. Шустов, И. В. Чернышева, В. В. Дмитренко и др., Ж. Физ. Конф. Сер. **675**, № 4, (2016). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/675/4/042024>.
- [7] С. Е. Улин, В. В. Дмитренко, К. Ф. Власик и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **47**(6), 32 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068335620060081>.

Поступила в редакцию 29 апреля 2025 г.

После доработки 6 августа 2025 г.

Принята к публикации 7 августа 2025 г.