

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

На правах рукописи

Маджидов Азизбек Истамович

**БЕСПИЛОТНЫЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ
КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАДИАЦИОННО-ОПАСНЫХ
ОБЪЕКТОВ**

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук,
Полухина Наталья Геннадьевна

Москва – 2025

Оглавление

Введение	3
Глава 1 Обзор современных беспилотных гамма-спектрометрических комплексов.....	8
1.1 Роботизированные комплексы, оснащённые дозиметрами	9
1.2 Роботизированные комплексы, оснащённые сцинтилляционными детекторами	13
1.3 Роботизированные комплексы, оснащённые полупроводниковыми детекторами	22
Заключение к Главе 1	24
Глава 2. Ксеноновый гамма-спектрометр в качестве регистрирующего устройства на борту беспилотного гамма-спектрометрического комплекса.....	25
2.1 Ксеноновый гамма-спектрометр	25
2.2 Минимальная детектируемая активность ксенонового гамма-спектрометра.....	31
Заключение к Главе 2	35
Глава 3 Метод определения глубины и размеров области залегания радиоактивных источников с помощью ксенонового гамма-спектрометра.....	36
3.1 Методы определения глубины и размеров области залегания радиоактивных источников	36
3.2 Моделирование эксперимента по определению глубины залегания гамма-источников с помощью ксенонового гамма-спектрометра.....	40
3.3 Экспериментальное определение глубины залегания гамма-источников для различных поглотителей.....	45
3.4 Определения местоположения и и размеров области залегания радиоактивных источников	56
Заключение к Главе 3	65
Глава 4 Лабораторные и полевые испытания беспилотного гамма-спектрометрического комплекса	66
4.1 Программное обеспечение для дистанционного набора гамма-спектров	66
4.2 Беспилотный гамма-спектрометрический комплекс	72
4.3 Лабораторные испытания БГСК	76
4.4 Испытания БГСК в полевых условиях НИЯУ МИФИ	96
4.5 Испытания БГСК на тестовых площадках МФ ФГУП «РАДОН»	98
Выводы к главе 4	100
Заключение и выводы	101
Список литературы.....	103

Введение

Актуальность темы диссертации

В настоящее время широко используются беспилотные гамма-спектрометрические комплексы (БГСК) для мониторинга радиационно-опасных объектов. Одним из направлений их применения является контроль за радиационной обстановкой окружающей среды и выявление радионуклидного состава загрязненных территорий с помощью дистанционно управляемых комплексов.

На сегодняшний день наиболее широко применяются следующие спектрометрические приборы для регистрации гамма-излучения в составе БГСК:

1. Сцинтилляционные детекторы на основе кристаллов NaI(Tl), CsI(Tl) и др., недостатком которых является невысокое энергетическое разрешение;
2. Полупроводниковые детекторы на основе кристаллов сверхчистого германия, которые требуют охлаждения до криогенных температур при их эксплуатации.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания новых типов БГСК с хорошим энергетическим разрешением и высокими эксплуатационными характеристиками.

Целью работы было создание на базе ксенонового гамма-спектрометра (КГС) мобильного роботизированного гамма-спектрометрического комплекса для мониторинга радиационно-опасных объектов и контроля за обращением с радиоактивными отходами (РАО).

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- разработка, реализация и апробация метода определения глубины залегания радиоактивных источников гамма-излучения по отношению площади пика полного поглощения к площади комптоновской долины в спектрах, измеренных с использованием КГС;
- обеспечение эксплуатационных характеристик, соответствующих требованиям эффективного мониторинга радиационно-опасных объектов:

- высокое энергетическое разрешение ($\sim 1,7\%$ на линии 662 кэВ);
- широкий энергетический диапазон регистрируемых гамма-квантов (~ 50 кэВ – 3 МэВ);
- высокая устойчивость к внешним вибро-акустическим воздействиям (~ 100 дБ);
- способность работать в широком температурном диапазоне ($0-90$ °С);
- высокая радиационная стойкость ($10^7 - 10^8$ н/см²).

Научная новизна

1. Впервые разработан и создан мобильный гамма-спектрометрический комплекс для контроля радиационной обстановки при выводе из эксплуатации ядерно- и радиационно-опасных объектов на базе КГС, соответствующий лучшим мировым аналогам по энергетическому разрешению, радиационной стойкости, рабочему температурному диапазону и устойчивости к внешним вибро-акустическим воздействиям.
2. Предложен и успешно реализован метод определения глубины залегания радионуклидов с использованием КГС.

Практическая значимость работы:

Разработанный комплекс может быть использован в исследовании радиационно-загрязненных территорий, при выводе из эксплуатации ядерно-физических объектов, контроле за радиационной обстановкой и радиационно-экологическом мониторинге объектов окружающей среды.

Положения, выносимые на защиту

1. Создание беспилотного гамма-спектрометрического комплекса для мониторинга радиационно-опасных объектов.
2. Метод определения глубины залегания точечных источников на основе анализа энергетических спектров, измеренных КГС.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

1. Совпадением расчетных характеристик ксенонового гамма-спектрометра на основе ионизационной камеры с результатами его калибровки (энергетическое разрешение $1,7 \pm 0,3$ % и эффективность регистрации $2 \pm 0,5$ % на линии 662 кэВ);
2. Совпадением измеренных с помощью ксенонового гамма-спектрометра энергий и активностей стандартных гамма-источников с их паспортными данными;
3. Использованием сертифицированной измерительной аппаратуры при проведении различных гамма-спектрометрических исследований;
4. Результатами полевых тестовых измерений радиационного фона на пилотной площадке Московского филиала ФГУП «РАДОН», которые в пределах погрешностей измерений были подтверждены другими спектрометрическими комплексами.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в работе, получены при определяющем участии автора.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных и Российских конференциях:

1. 28-я Международная научная конференция молодых учёных и специалистов (AYSS-2024). Доклад: Application of the automated and robotic gamma-spectrometric complex for radiation hazard situation assessment, 2024 г., Россия, г. Дубна;
2. XXXIV Международная научно-техническая конференция «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА». Доклад: Использование роботизированного гамма-комплекса в целях обнаружения и идентификации радиоактивных источников, 2023 г., Россия, г. Санкт-Петербург;
3. II Международная школа-конференция молодых ученых «АТОМ. НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ». Доклад: Разработка автоматизированного и

роботизированного комплекса на базе ксенонового гамма-спектрометра для задач ВЭ ЯРОО и контроля хранения РАО, 2023 г., Казахстан, г. Алма-Аты;

4. XVI Международное совещание «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии». Доклад: Гамма-спектрометрический комплекс на основе ксеноновой ионизационной камеры для роботизированной платформы, 2023 г, Россия, г. Москва;

5. V Международная научная конференция «Техногенные системы и экологический риск». Доклад: Автоматизированный и роботизированный гамма-спектрометрический комплекс для исследования ядерно-физических установок при выводе их из эксплуатации и контроля за радиационной обстановкой, 2022 г., Россия, г. Москва;

6. Международная научно-практическая конференция «Современное состояние и перспективы развития атомной промышленности в Республике Казахстан», посвященная 120-летию академика И.В. Курчатова. Доклад: Автоматизированный и роботизированный комплекс с ксеноновым гамма-спектрометром для исследования радиоактивно загрязненных территорий, 2023 г., Россия, г. Москва.

Публикации

По теме диссертации в период с 2020 по 2025 гг. опубликовано 7 работ в рецензируемых изданиях, в том числе 5 в периодических статьях, рекомендованных ВАК, и/или в журналах, включенных в базы Web of Science и Scopus.

Список публикаций автора по теме диссертационной работы

1. А. И. Маджидов и др. Метод определения глубины залегания источников гамма-излучения с использованием ксенонового гамма-спектрометра // Журнал технической физики, 2025 г. Вып. 6. Method for determining the depth of deposit of gamma-ray radiation sources using a xenon gamma-ray spectrometer. Technical Physics.

2. А. И. Маджидов, В. В. Дмитренко, С. Е. Улин и др. Влияние коллиматора и поглотителя на спектры, измеренные с помощью прототипа ксенонового гамма-спектрометра // Радиоактивные отходы, 2024 г. Вып. 1 Стр. 26-34 DOI: 10.25283/2587-9707-2024-1-26-34

3. А. И. Маджидов, В. В. Дмитренко, С. Е. Улин и др. Перспективы использования ксенонового гамма-спектрометра в качестве регистрирующего устройства на борту автоматизированного и роботизированного гамма-спектрометрического комплекса для вывода из эксплуатации ядерно-физических установок // Радиоактивные отходы, 2022 г. Вып. 2 Стр. 56-67, DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-56-67

4. С. Е. Улин, В. В. Дмитренко, Маджидов и др. Гамма-спектрометрический комплекс для вывода ядерных объектов из эксплуатации // Краткие сообщения по физике ФИАН, 2020г. Т. 47, Вып. 6 Стр. 32-40. Gamma Spectrometry System for Decommissioning Nuclear Facilities // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2020 Vol. 47, No. 6, pp. 176-180, DOI: 10.3103/S1068335620060081

5. Yujakov, I.A., Madzhidov, A.I., Dmitrenko, V.V. et al. Investigation of the Capabilities of a Xenon Gamma-Ray Spectrometer to Assess the Activity of an Isotope ^{60}Co . Phys. Part. Nuclei Lett. 21, 739–742 (2024). DOI:10.1134/S154747712470122X

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 107 страницы, 90 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 35 ссылок.

Глава 1 Обзор современных беспилотных гамма-спектрометрических комплексов

Современное развитие робототехники и гамма-спектрометрических приборов позволяют создавать новые комплексы с широкими возможностями для решения задачи радиационной разведки, обнаружения и контроля радиоактивных объектов. Применение гамма-детекторов с высокими энергетическим разрешением и эффективностью регистрации позволит надежно находить радиоактивные источники, идентифицировать радионуклиды, анализировать их состав и оценивать активность, т.е. проводить полную характеристику объектов.

Исследования и разработки в области гамма-спектрометрических детекторов активно развиваются во всём мире. На сегодняшний день коммерчески доступны гамма-спектрометры следующих типов:

- сцинтилляционные;
- полупроводниковые;
- газонаполненные.

Наиболее распространенными и простыми в производстве являются сцинтилляционные гамма-детекторы на основе кристаллов NaI, CsI, однако их энергетическое разрешение существенно хуже, чем у аналогов. Среди сцинтилляционных детекторов можно выделить приборы на основе LaBr₃. Они обеспечивают лучшее по сравнению с NaI, CsI разрешение, однако их производство дорого, а изготовление больших кристаллов является технологически сложной задачей. К тому же эти кристаллы имеют внутреннюю радиоактивность из-за сложности устранения естественного нестабильного изотопа ¹³⁸La.

Полупроводниковые гамма-спектрометры на базе сверхчистого германия обладают рекордным энергетическим разрешением. Однако их применение ограничено необходимостью использования систем охлаждения для создания криогенных температур, обеспечивающих оптимальной режим

работы полупроводниковых детекторов. Способные работать при комнатной температуре полупроводниковые детекторы на основе CdZnTe не обладают таким же высоким энергетическим разрешением, как германиевые аналоги. Кроме того, производство кристаллов больших размеров сопряжено с техническими проблемами, поэтому они, как правило, обладают небольшой эффективностью из-за малых размеров.

Газонаполненные ксеноновые гамма-спектрометры являются компромиссным вариантом между полупроводниковыми и сцинтилляционными детекторами. Это позволяет создавать приборы с хорошей эффективностью и энергетическим разрешением для решения широкого круга задач, в частности, для радиационной разведки, обнаружения и контроля радиоактивных объектов.

Установив гамма-спектрометр на мобильную платформу, можно расширить возможности аппаратуры для проведения удаленного, управляемого или автономного мониторинга радиационно-опасных территорий, что значительно повысит безопасность персонала во время проведения таких измерений. На сегодняшний день есть различные варианты коммерчески доступных решений мобильных платформ, которые совместно с гамма-детекторами различных типов позволяют создавать роботизированные и автоматизированные комплексы для радиационного мониторинга.

1.1 Роботизированные комплексы, оснащённые дозиметрами

Роботизированные платформы с дистанционным управлением активно использовались при авариях на АЭС и промышленных предприятиях. В качестве измерителя мощности экспозиционной дозы гамма-излучения и выдачи светового сигнала о превышении мощности порогового значения использовались дозиметры, такие как ИМД-21 (рис.1) на борту дистанционно управляемых комплексов «Мобот Ч-ХВ» и «Мобот Ч-ХВ-2» (рис.2), которые были разработаны в МВТУ им. Баумана [1]. Задачами данных комплексов являлись – ведения дозиметрической разведки, очистка кровли на крыше 3 энергоблока Чернобыльской АЭС и т.д.



Рисунок 1. Измеритель мощности дозы ИМД-21.

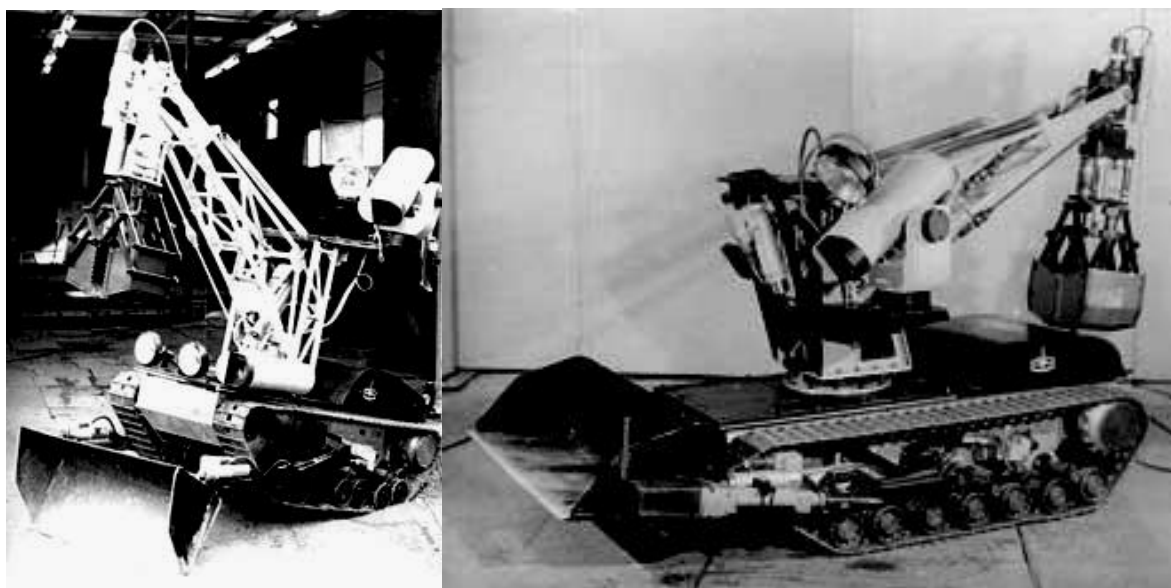


Рисунок 2. «Мобот Ч-ХВ» слева и «Мобот Ч-ХВ-2» справа.

Дозиметры в основном состоят из ионизационной камеры (счётчик Гейгера-Мюллера), просты в применении, имеют долгий срок эксплуатации.

На рисунке 3 представлен модифицированный робот ClearpathHusky, оснащенный персональным дозиметром RadEye G-10 [2].

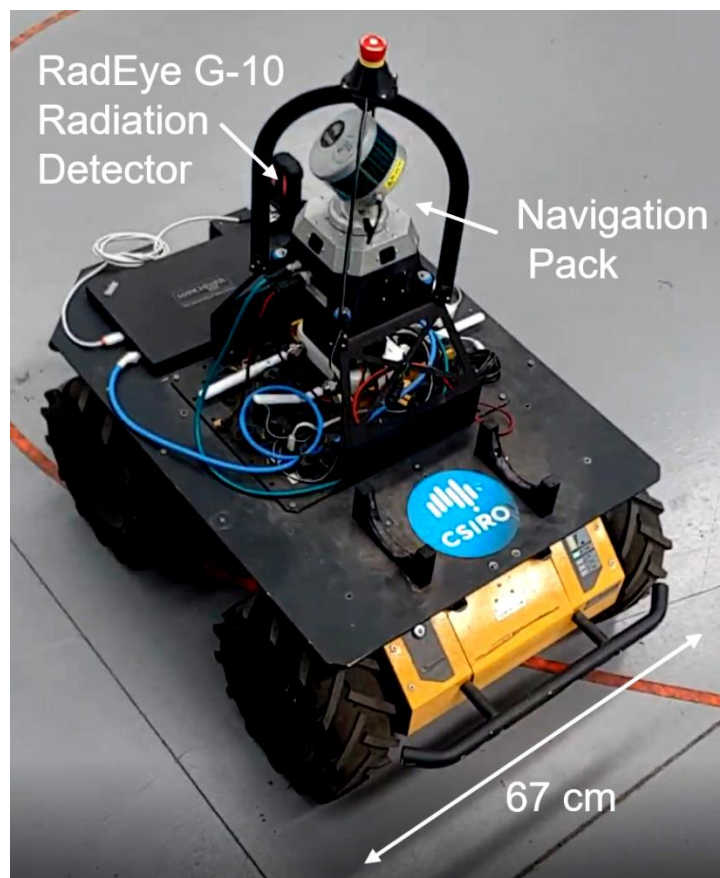


Рисунок 3. Робот Clearpath Husky с дозиметром RadEye G-10.

Этот беспилотный комплекс имеет у себя на борту персональный гамма-дозиметр и коммуникационный узел Rajant Bread Crumb ES1 для связи с базовой станцией оператора. Робот проводил обследования внутри помещения и построил карту излучения и определил расположение двух радиоактивных источников (рис.4).

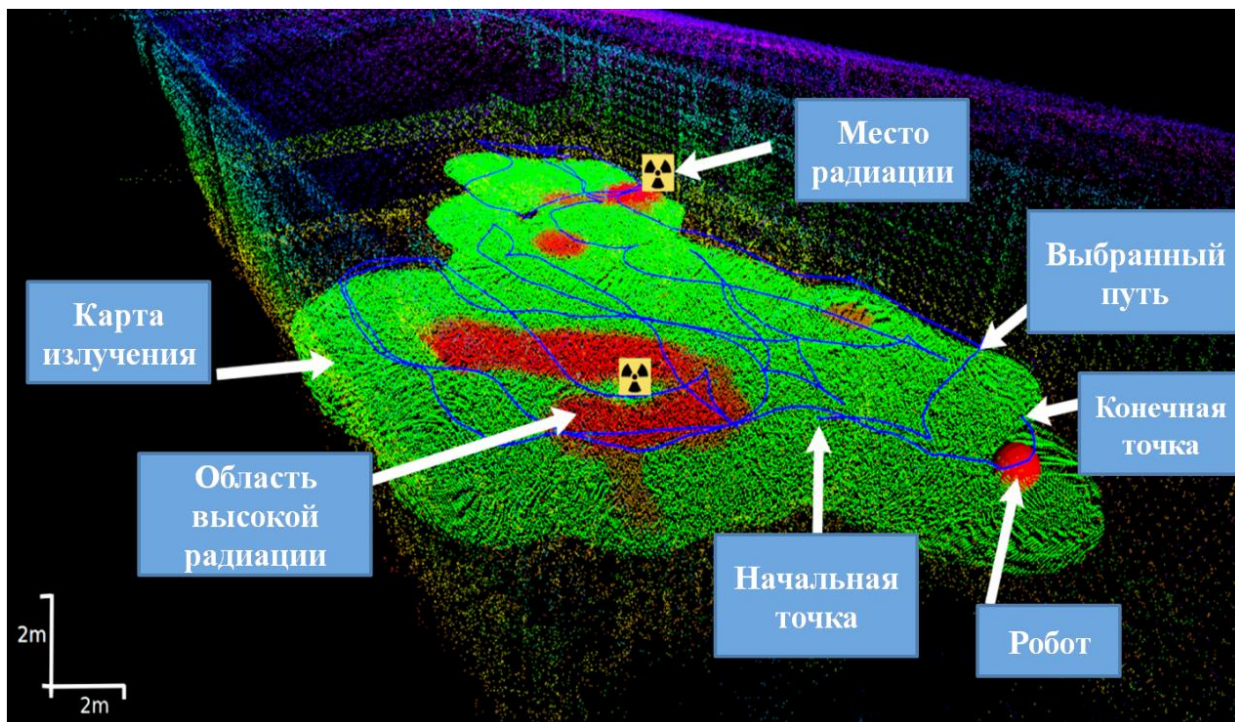


Рисунок 4. Полученная карта радиоактивности при исследовании помещения.

Роботы PMORPH (с возможностью изменения формы) и SCORPION были разработаны для прохода через трубопровод диаметром 100 мм, который обеспечивал доступ к внутреннему пространству первичной защитной оболочки ядерного реактора первого блока АЭС «Фукусима-1». SCORPION был последним роботом, с помощью которого была предпринята попытка исследовать внутреннюю часть реактора второго блока. Роботы PMORPH и SCORPION показаны на рис. 5 [3].



Рисунок 5. Робот серии PMORPH, используемый внутри ядерного реактора первого блока АЭС «Фукусима-1» (слева), и исследовательский мобильный робот для мониторинга радиоактивных утечек (справа).

Роботы SCORPION и PMORPH определяли состояния остатков топлива визуально и путем дозиметрического измерения излучения реактора первого энергоблока АЭС «Фукусима-1».

1.2 Роботизированные комплексы, оснащённые сцинтилляционными детекторами

Сегодня наиболее широко используются сцинтилляционные гамма-детекторы на основе кристаллов NaI(Tl) в анализе радиоактивной обстановки окружающей среды и определения радиоактивных изотопов в веществе. Основные достоинства детекторов NaI(Tl) являются следующими:

1. Относительно невысокая цена;
2. Быстродействие: время высвечивания сцинтилляции $\sim 0,23$ мкс;
3. Сравнительно большой атомный номер ($Z \approx 50$) и плотность кристалла ($\rho = 3,67$ г/см³);
4. Высокая эффективность.

Основные недостатки детекторов NaI(Tl):

1. Гигроскопичность;
2. Зависимость энергетического разрешения от размеров кристалла;
3. Спектрометрические характеристики детектора существенно зависят от температуры;
4. Гамма-детекторы на основе кристалла NaI(Tl) имеют невысокое энергетическое разрешение: от 6 до 12 % на линии 662 кэВ.

Использование детекторов на основе кристаллов NaI(Tl) нашло широкое применение в области робототехники, например, на борту беспилотного наземного транспортного средства Orpheus-X4 – четырехколесного робота среднего размера с дифференциальным приводом (рис.6), характеристики которого представлены в Таблице 1. Данный комплекс предназначен для локализации точечных источников гамма-излучения [4].

Таблица 1. Характеристики Orpheus-X4

Размеры	950 × 590 × 415 мм
Масса	51 кг
Время работы	120 мин
Максимальная скорость	15 км/час
Размер сцинтиллятора NaI	5,08× 5,08 см



Рисунок 6. Роботизированный комплекс Orpheus-X4.

Для того, чтобы проверить метод отображения радиоактивного загрязнения, источники были помещены заранее на исследуемую территорию, с интервалом, достаточным для облегчения их дифференциации. Расстояние между параллельными линиями было установлено на 1 м. Сбор данных занял 15 мин. Карта, полученная в результате применения триангуляции Делоне, показана на рис. 7, где черный крест обозначает позицию источников ^{60}Co и ^{137}Cs , полученный в результате интерполяции. Для оценки результатов перед экспериментом было измерено

точное положение источников. Средняя погрешность вычисленных позиций источников соответствовала 0,06 м.

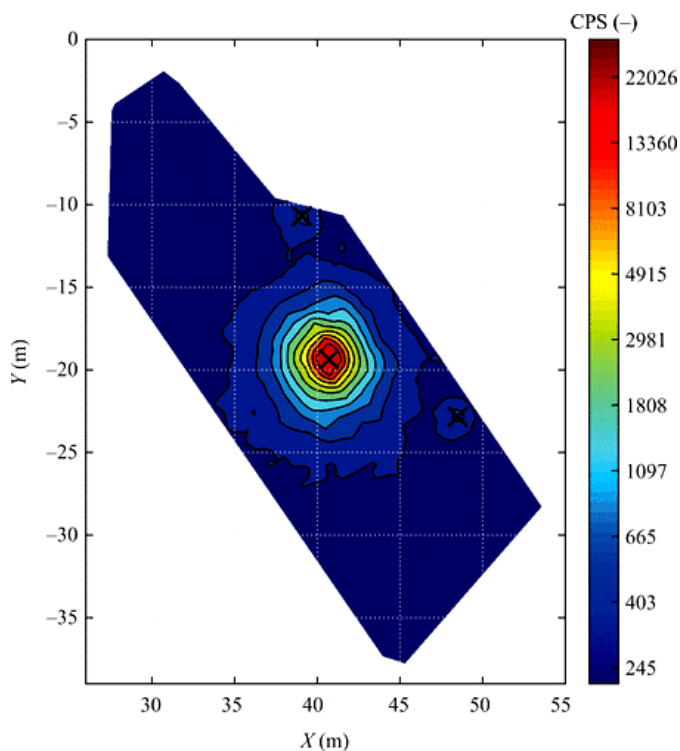


Рисунок 7. Карта радиоактивного загрязнения.

Еще одним типом используемых сцинтилляционных детекторов являются приборы на основе кристалла CsI(Tl), который обладает значительно меньшей гигроскопичностью по отношению к кристаллу NaI(Tl). По сравнению NaI(Tl), кристаллы CsI(Tl) являются более пластичными, в результате чего можно создавать на их основе детекторы разных конфигураций.

Детекторы на основе CsI(Tl) обладают следующими достоинствами:

1. Простая технология изготовления;
2. Невысокая стоимость даже при изготовлении кристаллов больших размеров;
3. Большие по сравнению с NaI(Tl) эффективный атомный номер ($Z \approx 54$) и плотность ($\rho = 4,51 \text{ г/см}^3$).

Основные недостатки детекторов CsI(Tl):

1. Энергетическое разрешение $\sim 8 - 10 \%$ на линии 662 кэВ;
2. Большое время высвечивания ($\sim 1 \text{ мкс}$);

3. Низкая радиационная стойкость.

Сцинтилляторы CsI(Tl) использовались российскими учёными для радиологического обследования загрязненных установок исследовательского реактора перед демонтажем в условиях высоких доз [5]. К роботизированному комплексу Brokk-90 прикрепляется детектор на основе кристалла CsI(Tl) для дистанционных измерений радиоактивности (рис.7).



а)

б)

с)

Рисунок 7. а) Радиометрическая система роботизированного комплекса Брокк-90, б) дистанционно управляемая портативная спектрометрическая система, с) портативная гамма-камера «Gammavisor».

Система состоит из детектора для измерения дозы облучения в диапазоне от 0,4 мЗв/ч до 8,5 Зв/ч; коллимированного детектора (толщина защиты 30 мм) для измерения гамма-излучения; камеры с 26-кратным оптическим зумом, для подробного визуального осмотра объектов во время радиационного обследования.

Демонтаж, сортировка, сегментация и удаление оборудования из хранилищ отработанного ядерного топлива является одним из этапов вывода из эксплуатации. Радиометрическая система роботизированного комплекса Брокк-90, дистанционно управляемая портативная спектрометрическая система и портативная гамма-камера «Gammavisor», были использованы для проведения обследования бассейна-хранилища в главном зале реактора (рис.8). Управление измерительной аппаратурой осуществлялось дистанционно из безопасного пространства.

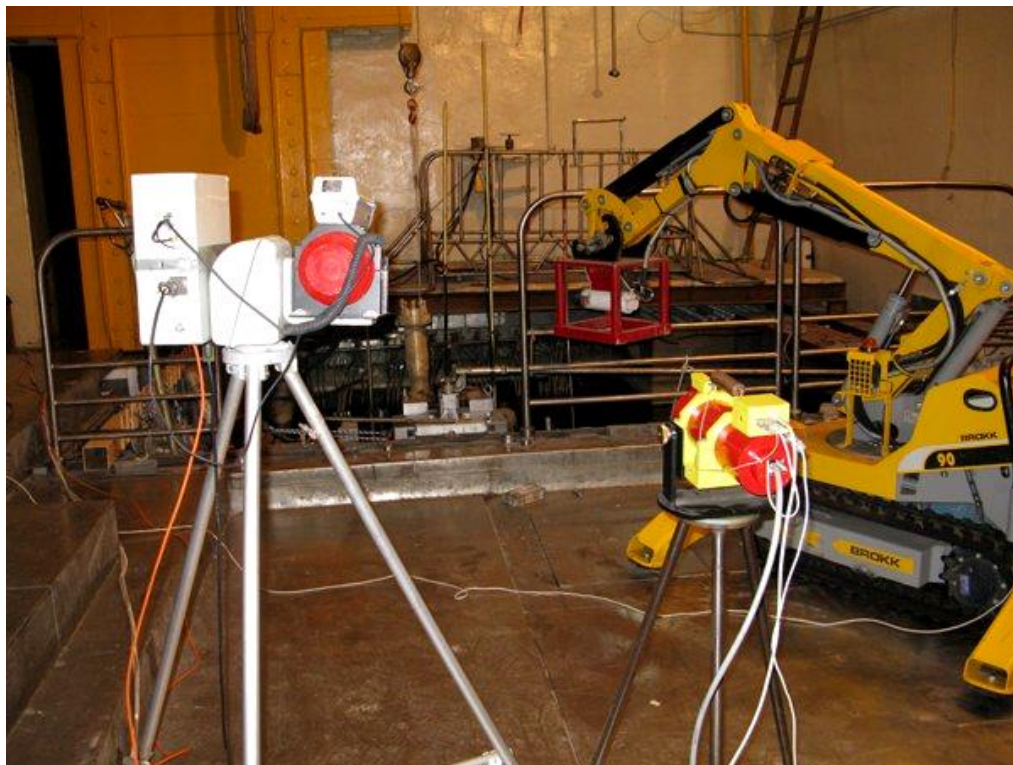


Рисунок 8. Расположение оборудования при обследовании бассейна-хранилища.

Спектральный состав радионуклидов определяют с помощью портативной спектрометрической системы, а гамма-изображения объекта исследования в сочетании с видео - с помощью «Gammavisor».

Проведен анализ спектров излучения с использованием разработанных методов и определена активность радионуклидов по каждому из каналов исследовательского реактора. Результаты измерений показали, что большинство каналов содержат радионуклид ^{60}Co .



Рисунок 9. Изображение, полученное от радиометрической системы роботизированного комплекса «Брокк-90», и содержащее информацию о мощности дозы на открытых и коллимированных детекторах.

После сканирования видеоизображения анализировались в лаборатории. В результате было составлено распределение дозы на длину элементов канала. Его сравнивали с распределением активности, полученным компактной гамма-камерой «Gammapvisor».

Успешной оказалась адаптация комплексных дистанционных измерений радиоактивности и обследование загрязненных установок исследовательского реактора перед демонтажем в условиях высоких доз. В полевых условиях были опробованы приборы для измерения радиоактивности, предназначенные для работы на фоне высоких, неоднородных доз, и получены новые данные об измерении распределения загрязнения в помещениях и на установках.

Сцинтилляционные детекторы на основе кристалла CeBr_3 нашли применение для радиационного картирования помещений ядерного реактора.

Преимущества детекторов на основе CeBr_3 :

1. Простая технология изготовления;
2. Короткое время высвечивания 20 нс;
3. Высокий световыход 60 фотон/кэВ;

4. Собственное низкое излучение фона 0,004 Бк/см;

Кристаллы CeBr_3 имеют определенные недостатки:

1. Энергетическое разрешение $\sim 4,7\%$ на линии 662 кэВ;

2. Низкая радиационная стойкость.

3. Небольшой по сравнению с NaI(Tl) эффективный атомный номер ($Z \approx 46$) и плотность ($\rho = 5,3 \text{ г/см}^3$).

Сбор и интерполяция данных радиационных наблюдений имеют жизненно важное значение для поддержания обычных операций в ядерном секторе во всем мире, а также для завершения обследований в ходе реагирования на различные ядерные инциденты. Ученые из Манчестерского университета (Великобритания) используют детекторы на основе CeBr_3 на борту роботизированной системы для уменьшения воздействия ионизирующего излучения, которым может подвергаться рабочий персонал в ходе таких обследований. В работе учёных предлагается новый подход к интерполяции измерений, собранных с робота, который преодолевает проблемы, связанные с сложными измерениями радиоактивных источников. Пригодность предложенного метода демонстрируется путем его применения к данным, собранным с помощью специальной роботизированной системы (рис.10), используемой для проведения обследования ядерного реактора TRIGA Mark II Института Джозеф-Стефана в ходе его постоянной эксплуатации, где показана успешная реконструкция гамма-дозиметрических оценок в реакторном зале и помощь в идентификации источников ионизирующего излучения [6].

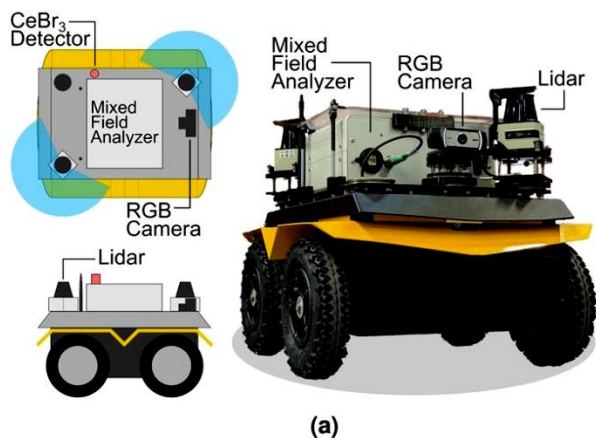


Рисунок 10. (а) Роботизированная платформа, состоящая из Clearpath Robotics Jackal UGV, передней и задней системы 2D Lidar, камеры RGB и приборов гамма-излучения. (б) Вид компактного сцинтилляционного детектора CeBr₃, используемого для этих исследований.

На рисунке 11 представлены результаты измерения радиационного загрязнения в реакторном зале.

Рисунок 11. Карта распределения источников в реакторном зале

Полученные карты содержат информацию об обследуемой среде и могут использоваться в качестве инструмента для поддержания будущей деятельности или дальнейших миссий по обследованию.

В 2012 году на АЭС «Фукусима-1» использовались роботы фирмы JAEA [7]: Brokk-90 (JAEA-1), два RESQ-A (JAEA-2/3), а также усовершенствованный JAEA-3 (рис.12) для проведения гамма-визуализации на различных этажах здания второго энергоблока через шесть месяцев после аварии.



Рисунок 12. Робот JAEA-3 с системой гамма-визуализации.

В качестве детектирующего устройства на борту робота JAEA-3 использовался гамма-детектор на основе сцинтиллятора CsI(Na) [8].

Первый робот Quince1 (рис.13) был развернут на площадке 20 июля 2011 года и использовался вплоть до 20 октября 2011 года [9]. За этот период было выполнено шесть миссий, позволивших определить состояние объектов и трубопроводов АЭС, что способствовало планированию и проведению восстановительных работ. Однако 20 октября робот Quince1 не вернулся после миссии наблюдения в здании второго энергоблока реактора. На обратном пути был поврежден кабель связи и робот был оставлен на 3-м этаже АЭС.

Мобильный робот Quince1, оборудованный сцинтилляционным детектором для мониторинга области гамма-излучения, описан в работе [10]. Мобильная система обеспечивает полный поворот на 180° для формирования профилей направленности излучения.



Рисунок 13. Робот Quince 1.

Задача этой установки – определить расположение близлежащих источников гамма-излучения. В качестве шасси используется блок Lynxmotion 4, на котором установлена вращающаяся платформа. Детектор на основе бромида лантана (LaBr_3) просматривается фотоумножителем Hamamatsu R6231, а контроллер представляет собой плату Lynxmotion Bot II с процессором BasicAtomPro 28.

1.3 Роботизированные комплексы, оснащённые полупроводниковыми детекторами

Новый робот RICA, предназначенный для характеристики РАО, представлен в работе [11]. Его масса 80 кг, размеры - 570×430×330 мм. Он используется для определения местоположения радиоактивных источников и измерения их активности. Робот перемещается с помощью платформы с полимерными гусеницами, на которой установлены две ПЗС-камеры переднего и заднего вида, а также белые фары на основе светодиодов для обеспечения освещения. В зависимости от цели использования, робот может комплектоваться различными наборами инструментов, например, механической рукой для отбора проб и гамма-спектрометром для их характеристики (рис. 14).



Рисунок 14. Роботизированная платформа RICA с гамма-камерой (слева) и манипулятором (справа).

Гамма-спектрометр изготовлен на основе кристалла CdZnTe размером 500 мм^3 в энергетическом диапазоне $0,04 - 1,9 \text{ МэВ}$ так же использовался в роботизированном комплексе Брокк-90 для измерения каналов реактора [12]. Результаты измерений показали, что большинство каналов содержат ^{60}Co , однако некоторые каналы содержат другие радионуклиды, например, радионуклид ^{94}Nb (рис. 15).

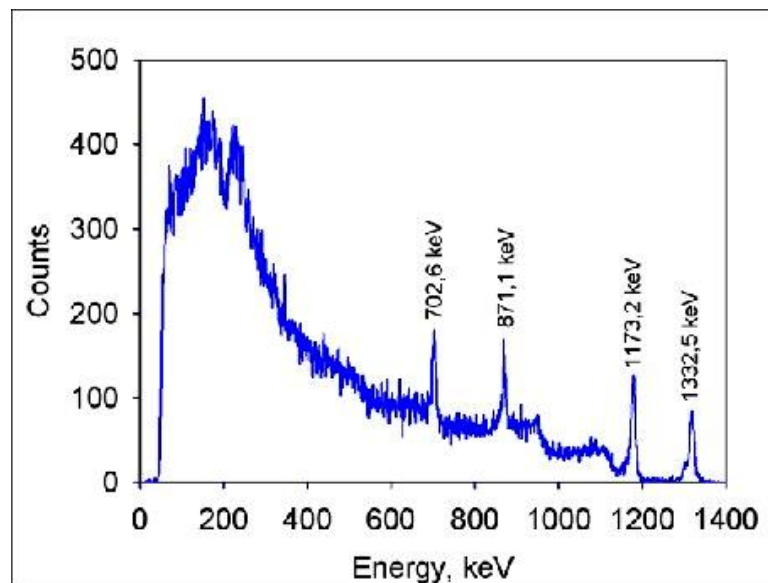


Рисунок 15. Экспериментальный гамма-спектр одного из каналов реактора.

Заключение к Главе 1

Большое количество разработанных роботизированных систем [13] позволяет сделать выбор оптимального инженерного решения для успешного решения поставленной задачи по мониторингу и характеристике радиоактивных загрязнений окружающей среды в результате аварий на АЭС, в том числе с использованием новых детектирующих и спектрометрических систем.

Глава 2. Ксеноновый гамма-спектрометр в качестве регистрирующего устройства на борту беспилотного гамма-спектрометрического комплекса

В данной главе приведены результаты исследования физико-технических характеристик ксенонового гамма-спектрометра.

2.1 Ксеноновый гамма-спектрометр

Составной частью ксенонового гамма-спектрометра (КГС) является ксеноновый гамма-детектор (КГД) на основе наполненной смесью сжатого ксенона с водородом цилиндрической ионизационной камеры с экранирующей сеткой, работающей в импульсном режиме [14]. Рабочий объем гамма – детектора равен 2000 см^3 при торцевой площади, равной 430 см^2 . Отношение рабочего объема ионизационной камеры к общему объему детектора равно примерно 85%. Общий вид КГД представлен на рисунке 16.

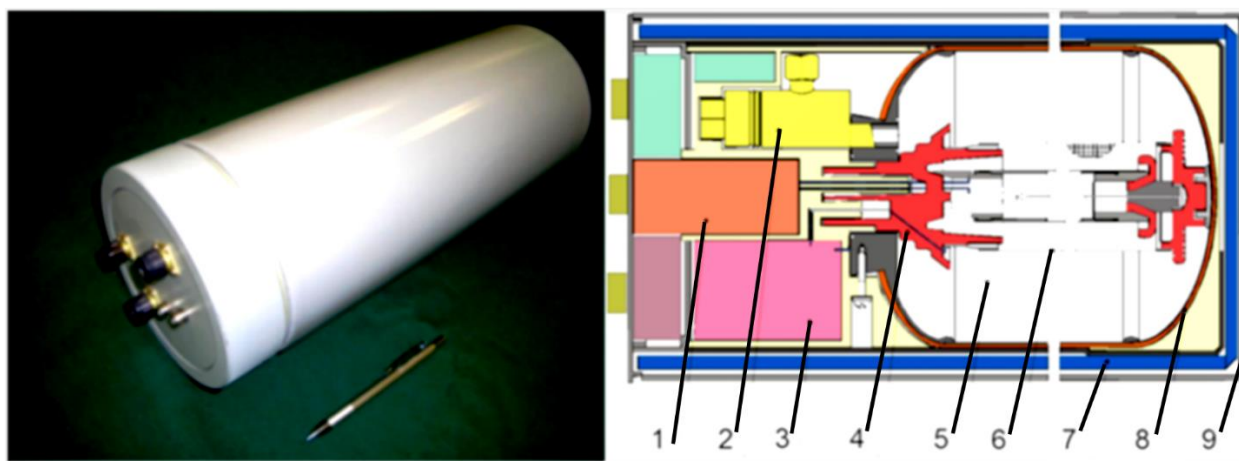


Рисунок 16. Фотография и схема КГС: 1 - зарядочувствительный усилитель, 2 - кран для наполнения детектора рабочим веществом, 3 - источник питания, 4 - керамический гермоввод, 5 - ионизационная камера, 6 - экранирующая сетка, 7 - тефлоновая изоляция, 8 - стальной корпус с композитным покрытием, 9 - внешний защитный корпус.

Физико-технические характеристики ксенонового гамма-детектора представлены в таблице 2.

Таблица 2. Основные физико-технические характеристики ксенонового гамма-детектора.

Наименование параметра и единицы измерения	Значение
Плотность ксенона, г/см ³	0,3
Концентрация водорода в рабочей смеси Xe+H ₂ , %	0,3
Давление ксенона при 23°C, атм	42
Диапазон измеряемых энергий гамма-квантов, МэВ	0,04-5
Энергетическое разрешение для энергии гамма-квантов 662 кэВ, %	1,7±0,3
Эффективность регистрации по пику полного поглощения для гамма-квантов с энергией 662 кэВ, %	2±0,5
Чувствительный объем, см ³	2000
Напряжение на сетке детектора, кВ	13
Напряжение на катоде детектора, кВ	21
Диаметр анода, мм	20
Диаметр сетки, мм	40
Диаметр катода, мм	117
Толщина стенки детектора, мм	3
Масса, кг	6
Габариты, см	Ø14×40
Энергопотребление, Вт	не более 25
Напряжение питания, В	~220 или +27
Диапазон рабочих температур (без системы терморегулирования), °С	от 0 до +90
Рабочий ресурс, лет	не менее 10

Для изучения спектрометрических характеристик КГС были набраны спектры от источников фотонного излучения типа ОСГИ (образцовые спектрометрические источники гамма-излучения) с активностью порядка

100 кБк. При измерении спектров гамма-источники располагались сбоку на расстоянии 20 см от центра КГД. Для обработки электрических импульсов с КГД и накопления энергетических спектров регистрируемого гамма-излучения использовался блок цифровой электроники, разработанный в НИЯУ МИФИ. Для анализа работы КГС и обработки данных в режиме реального времени использовался персональный компьютер с установленным специализированным программным обеспечением, разработанным также в НИЯУ МИФИ.

На рис. 19 - 20 приведены характерные спектры от гамма-источников ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{60}Co и ^{152}Eu , измеренные ксеноновым гамма-спектрометром.

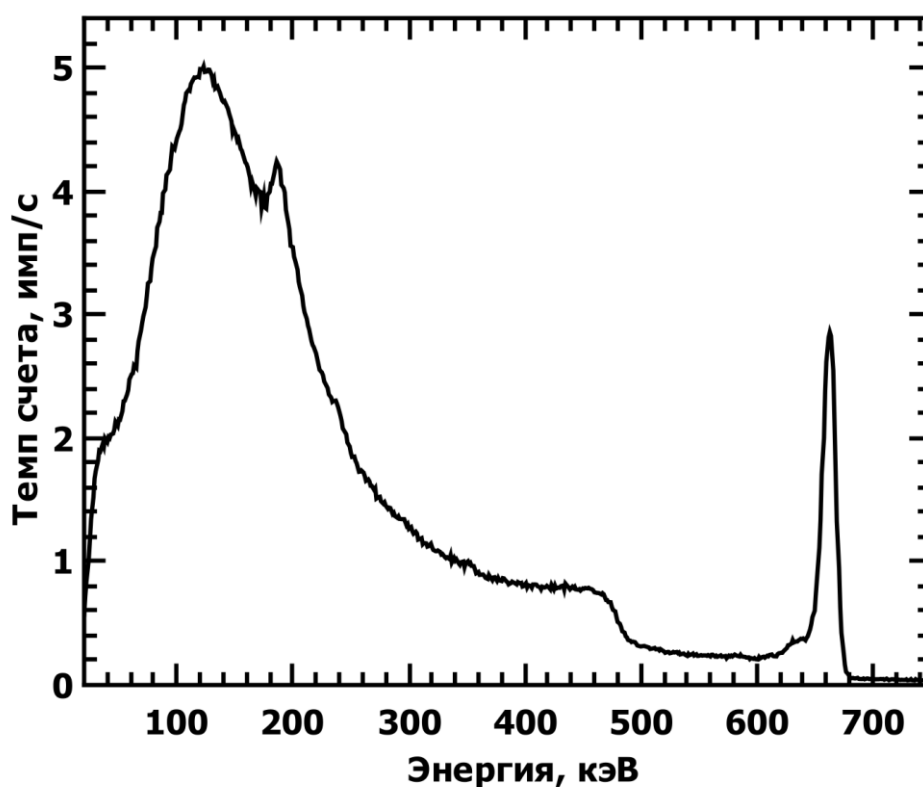


Рисунок 17. Спектр от источника ^{137}Cs , полученный при калибровке ксенонового гамма-детектора.

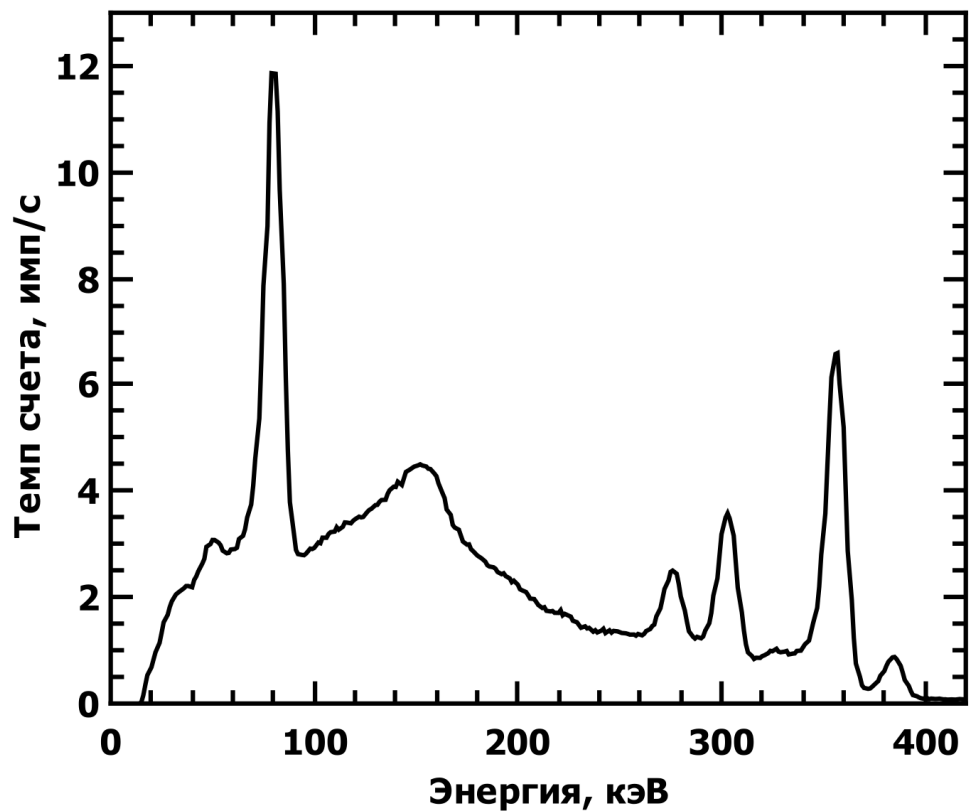


Рисунок 18. Спектр от источника ^{133}Ba , полученный при калибровке ксенонового гамма-детектора.

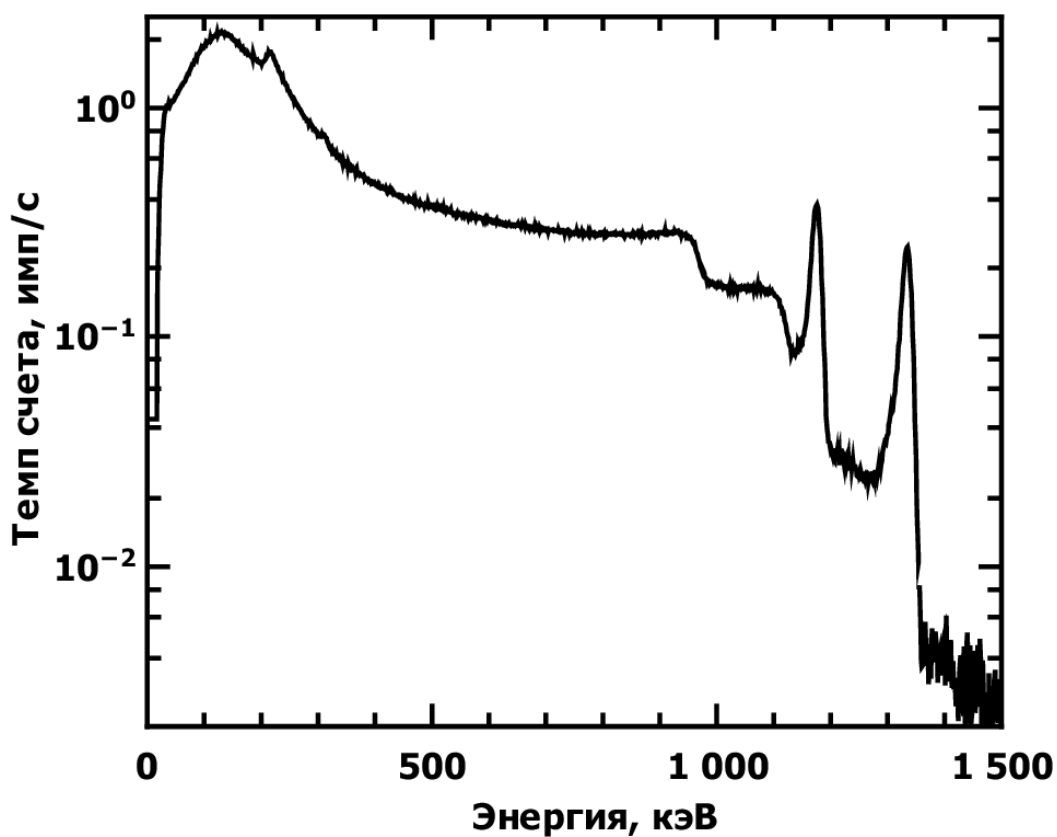


Рисунок 19. Спектр от источника ^{60}Co , полученный при калибровке ксенонового гамма-детектора.

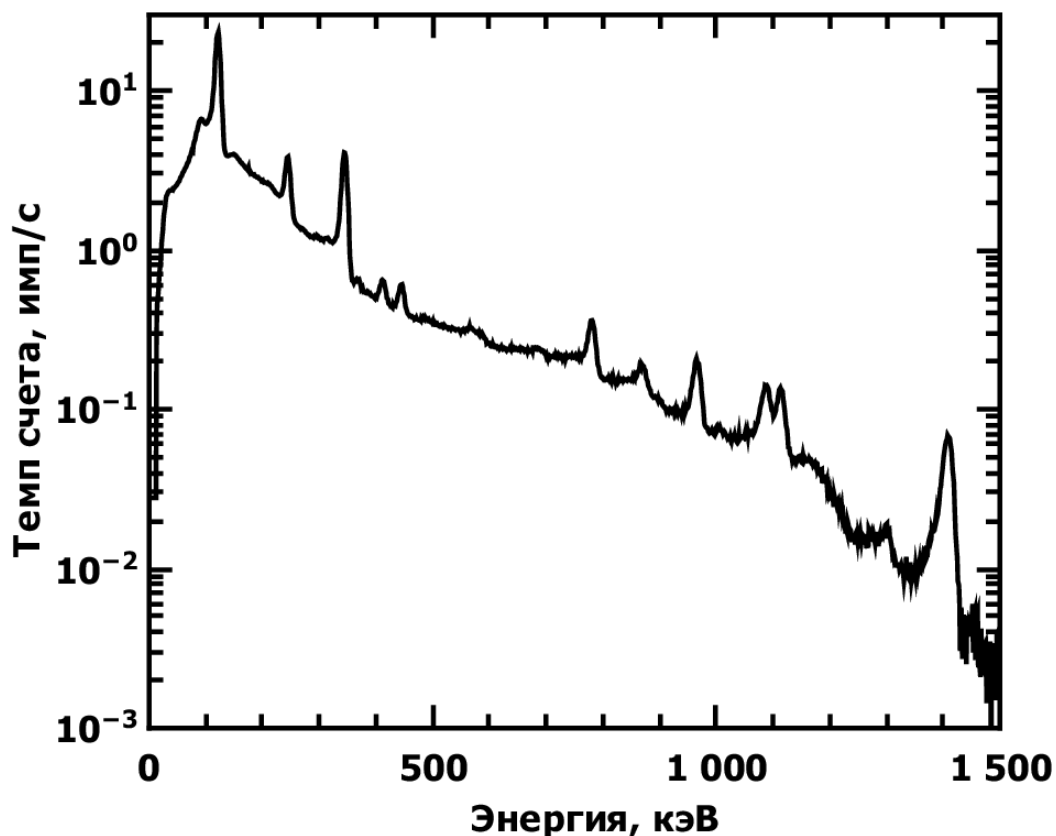


Рисунок 20. Спектр от источника ^{152}Eu , полученный при калибровке ксенонового гамма-детектора.

На рисунке 21 приведены зависимости энергетического разрешения ксенонового гамма-детектора с рабочим объемом 2000 см^3 , сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI(Tl) размером $\varnothing 7,62\text{ см} \times 7,62\text{ см}$ (СЦД) и полупроводникового детектора на основе кристалла сверхчистого германия размером $\varnothing 5\text{ см} \times 5\text{ см}$ (ППД) от энергии гамма-квантов (рис.21). Из приведенных экспериментальных результатов видно, что ксеноновый гамма-детектор обладает высоким энергетическим разрешением, которое составляет 1,7% для энергии гамма-квантов 662 кэВ, что в 4 раза лучше, чем энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора NaI(Tl) . При этом ксеноновые гамма-спектрометры не требуют охлаждения в отличие от полупроводниковых спектрометров на основе сверхчистого германия. ППД обеспечивают значительно лучшее энергетическое разрешение, которое достигает нескольких сотен эВ на линии 662 кэВ, однако для их функционирования необходимо поддерживать криогенную температуру кристалла. Это достигается при помощи жидкого

азота, либо механических систем охлаждения, которые ухудшают энергетическое разрешение полупроводникового прибора.

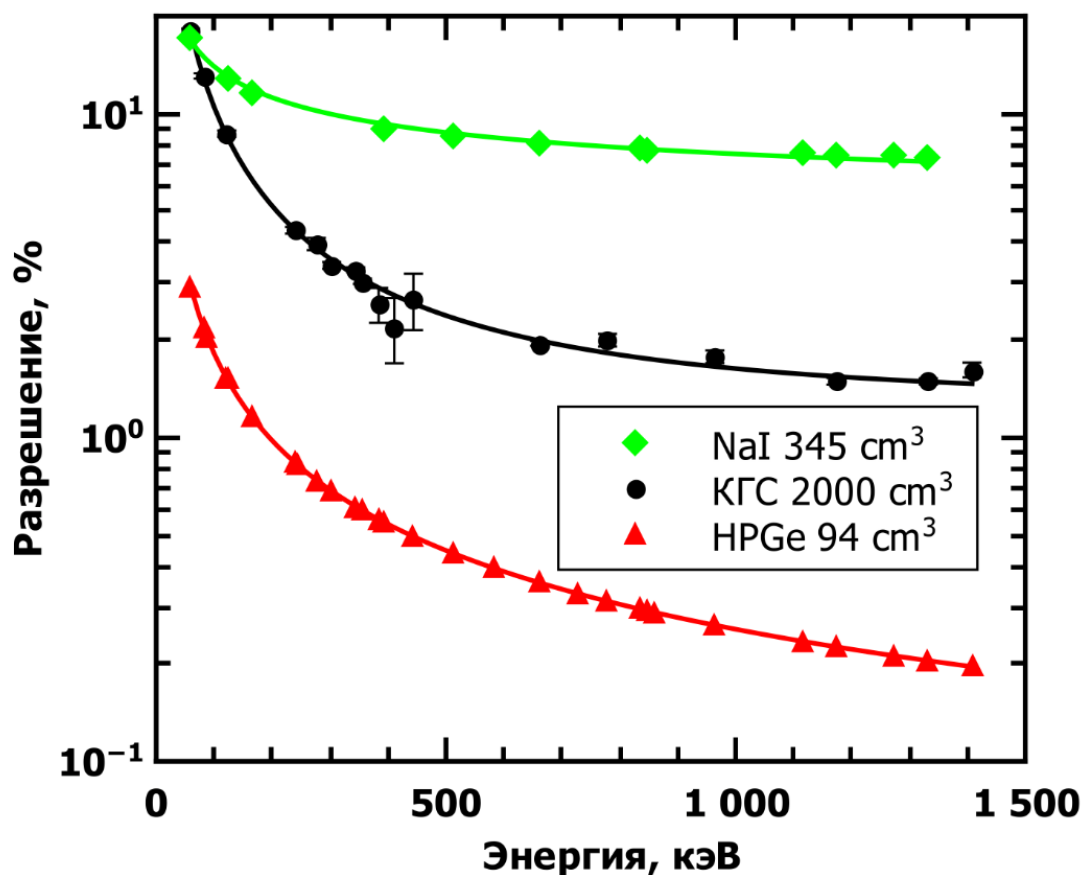


Рисунок 21. Зависимость энергетического разрешения ксенонового гамма-детектора с рабочим объемом 2000 см³, сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI(Tl) размером $\varnothing 7,62$ см $\times$ 7,62 см и полупроводникового детектора на основе кристалла сверхчистого германия размером $\varnothing 5$ см $\times$ 5 см от энергии гамма-квантов.

На рисунке 22 представлена зависимость эффективности регистрации КГС по пику полного поглощения от энергии гамма-квантов для перпендикулярного положения источника излучения к главной оси КГС на расстоянии 20 см от центра детектора. Для сравнения на рисунке 21 приведены данные для ППД.

Из рисунка 22 видно, что эффективность регистрации гамма-квантов КГС превосходит эффективность ППД в диапазоне энергий от 60 до 300 кэВ, но уступает ППД при регистрации гамма-квантов с энергиями более 300 кэВ. Следует отметить, что эффективность СЦД превосходит эффективности КГС

и ППД во всем диапазоне регистрируемых гамма-квантов, что особенно важно при регистрации гамма-квантов больших энергий.

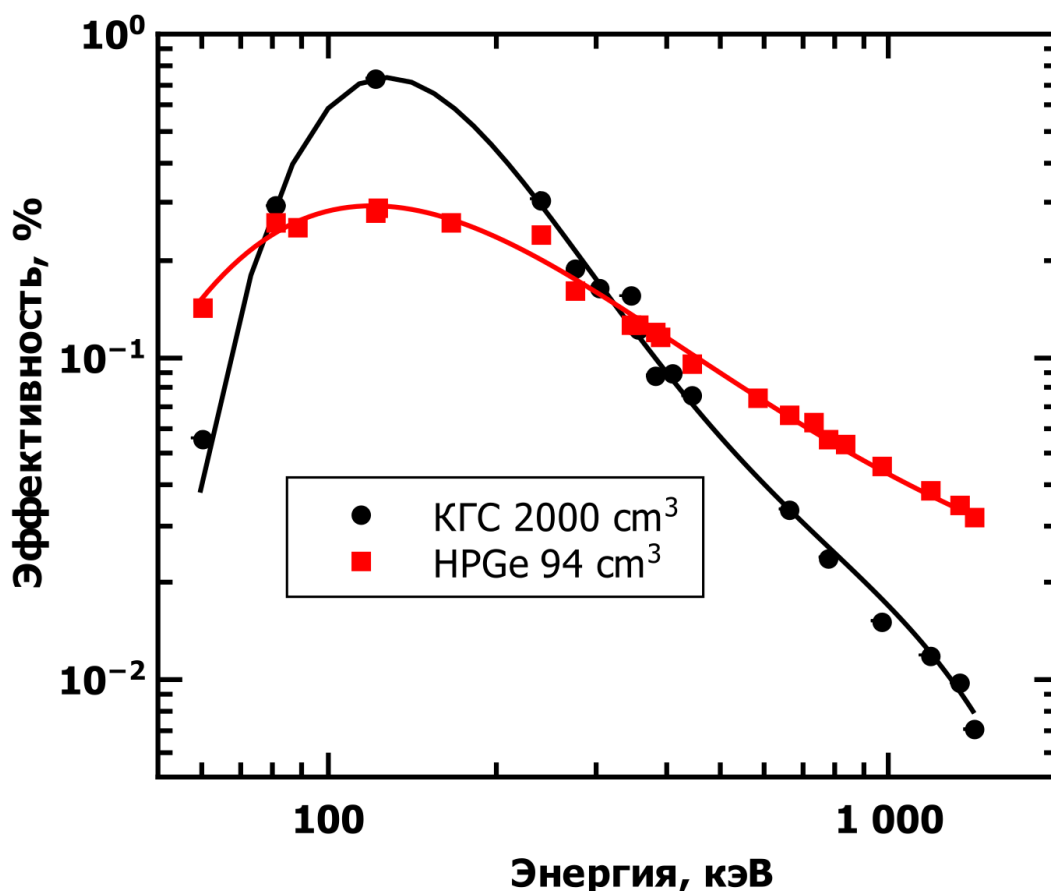


Рисунок 22. Зависимость эффективности ксенонового гамма-детектора с рабочим объемом 2000 см³ и полупроводникового детектора на основе кристалла сверхчистого германия размером Ø5 см×5 см от энергии гамма-квантов.

2.2 Минимальная детектируемая активность ксенонового гамма-спектрометра

Для определения минимально детектируемой активности (МДА) [15] КГС были проведены измерения спектров от гамма-источников типа ОСГИ. В экспериментах гамма-источники располагались сбоку и с торца детектора на расстоянии 50 см от центра КГС, время каждого измерения составляло 600 с. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3. Минимальная детектируемая активность КГС.

Изотоп	Энергия гамма-квантов, кэВ	МДА, кБк (с торца)	МДА, кБк (сбоку)
^{137}Cs	662	$0,26 \pm 0,01$	$6,53 \pm 0,08$
^{60}Co	1174	$1,1 \pm 0,1$	$13,6 \pm 0,2$
^{60}Co	1332	$0,5 \pm 0,01$	$13,0 \pm 0,3$
^{241}Am	60	-	$67,2 \pm 0,5$
^{133}Ba	80	-	$10,96 \pm 0,17$
^{133}Ba	276	$1,13 \pm 0,02$	$42,3 \pm 1,8$
^{133}Ba	302	$1 \pm 0,03$	$15,8 \pm 0,5$
^{133}Ba	356	$0,51 \pm 0,01$	$5,09 \pm 0,09$
^{133}Ba	386	$5,2 \pm 0,8$	48 ± 3
^{152}Eu	122	$1,89 \pm 0,01$	$7,35 \pm 0,03$
^{152}Eu	244	$4,07 \pm 0,03$	$37,7 \pm 0,5$
^{152}Eu	344	$0,71 \pm 0,06$	$13,22 \pm 0,13$
^{152}Eu	779	$2,46 \pm 0,12$	70 ± 2
^{152}Eu	964	$5,18 \pm 0,05$	74 ± 3
^{152}Eu	1408	$2,5 \pm 0,6$	62 ± 3

Выбранное расстояние связано с габаритами мобильной платформы, на которой расположен КГС, и соответствует расположению источника, который наиболее близко установлен по отношению к КГС. Время экспозиции выбрано таким образом, чтобы определять источники активностью более 10 кБк в зависимости от изотопа. Погрешность измерения МДА указана как 3 стандартных отклонения.

Основные характеристики ксенонового гамма-детектора с рабочим объемом 2000 см³, сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI(Tl) размером $\varnothing 7,62 \text{ см} \times 7,62 \text{ см}$ и полупроводникового детектора на основе кристалла сверхчистого германия размером $\varnothing 5 \text{ см} \times 5 \text{ см}$ представлены в таблице 4.

Таблица 4. Основные характеристики ксенонового гамма-детектора, сцинтилляционного детектора NaI(Tl) и полупроводникового HPGe детектора.

Характеристики	Ксеноновый детектор	NaI(Tl) детектор[16,17]	HPGe Детектор [18]
Плотность рабочего вещества, г/см ³	0,30	3,67	5,33
Эффективный атомный номер Z	54	51	32
Рабочий объем, см ³	2000 (Ø11,3x20 см ³)	345 (Ø7,6x7,6 см ³)	94 (Ø5x5 см ³)
Энергетический диапазон, МэВ	0,04-5	0,04-5	0,04-3
Энергетическое разрешение, % для энергии 662 кэВ для энергии 1332 кэВ	1,7 1,5	8 7	0,4 0,2
Эффективность регистрации по пику полного поглощения, % для энергии 122 кэВ для энергии 662 кэВ для энергии 1332 кэВ	0,73 0,033 0,01	0,55 0,24 0,16	0,28 0,07 0,035
Быстродействие: время собирания заряда, мкс время формирования сигнала, мкс	10	6	3
Интегральная нелинейность, %	≤ 0,5	≤ 1	≤0,1

Характеристики	Ксеноновый детектор	NaI(Tl) детектор[16,17]	HPGe Детектор [18]
Габариты, см	Ø15x45	Ø8x30	Ø8x30 без учета размеров криостата для хранения жидкого азота
Рабочая температура, °С	0- +90	+10 - +40	-196
Масса, кг	6	2	2-3

По сравнению с детекторами на основе сцинтилляционных и полупроводниковых кристаллов, КГС обладает рядом преимуществ:

- ксеноновый гамма-спектрометр имеет энергетическое разрешение в несколько раз лучше, чем у приборов на основе сцинтилляторов NaI и CsI;
- для своей работы КГС не требует охлаждения, в отличие от полупроводниковых спектрометров на основе сверхчистого германия [19];
- ксеноновый гамма-спектрометр, способен работать в условиях вибро-акустических воздействий до 100 дБ без ухудшения энергетического разрешения [20 -21];
- КГС способен работать при температурах до 90 °С без изменения спектрометрических характеристик прибора [22];
- спектрометрические характеристики ксенонового гамма-спектрометра не ухудшаются при прохождении через детектор флюенса нейтронов $1,5 \cdot 10^{10}$ частиц [23].

Заключение к Главе 2

Исследовались возможности применения различных модификаций гамма-спектрометров на основе сжатого ксенона в составе опытного образца комплекса по сортировке радиоактивных отходов [24], портального комплекса для контроля пассажирского потока [25], автоматизированной системы для контроля газообразных радиоактивных выбросов ядерного реактора [26]. Положительные результаты данных исследований демонстрируют возможность применения КГС для задач контроля вывода из эксплуатации ядерно- и радиационно-опасных объектов и обращения с РАО, осуществления мониторинга радиационной обстановки и аварийного реагирования на чрезвычайные ситуации, проведения радиационной разведки.

Глава 3 Метод определения глубины залегания и размеров радиоактивных источников с помощью ксенонового гамма-спектрометра

В данной главе приведены результаты исследования принципиальной возможности определения нуклидного состава и активности гамма-источников по анализу измеренных гамма-спектров при наличии поглотителя, находящегося между гамма-источниками и ксеноновым гамма-спектрометром, помещенным в цилиндрическую свинцовую защиту и без нее.

3.1 Методы определения глубины залегания и размеров радиоактивных источников

Несмотря на то, что существует множество радиоактивных продуктов деления, большинство этих изотопов распадаются достаточно быстро. Основными долгоживущими радионуклидами являются ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu . Подобные элементы могут находиться в составе радиоактивных отходов, утечек или выбросов после аварий ядерно-физических установок под развалинами слоев конструкций или земли.

Для определения типа радионуклида и глубины его залегания можно использовать полупроводниковый гамма-детектор на основе кристалла теллурида кадмия (CdTe). Данный тип полупроводникового гамма-детектора позволяет регистрировать как гамма-кванты, так и рентгеновское излучение по отношению темпов счетов, из которых можно определить глубину залегания радиоактивных источников, излучающих в двух диапазонах энергии [27]:

$$N = N_0 * e^{-\mu^* d},$$
$$d = \frac{1}{\mu_x - \mu_\gamma} * \log_e \frac{N_0}{N_{x/\gamma}}, \quad (1)$$

где μ_x и μ_γ коэффициенты поглощения рентгеновского и гамма-излучения, N_0 и $N_{x/\gamma}$ – темп счета на нулевой глубине и отношение темпов счета рентгеновских и гамма-фотопиков.

С помощью гамма-детектора на основе полупроводника CdTe был измерен спектр изотопа ^{137}Cs , который был расположен в кварцевом песке (рис.23). По результатам измерений была получена зависимость отношения темпов счета $\log_{10} N_0/N_{x/\gamma}$ от глубины залегания d (рис.24).

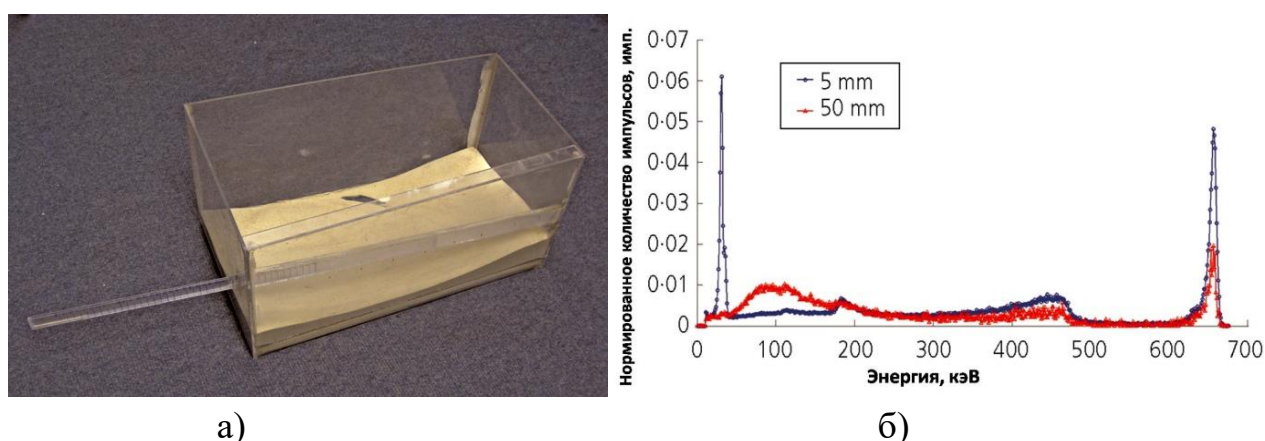


Рисунок 23. а) Фотография фантома, наполненного песком (кремний), где располагался радиоизотоп ^{137}Cs , б) Два спектра для закрытого точечного источника ^{137}Cs , помещенного на глубину 5 мм и 50 мм в кварцевый песок.

Рентгеновский фотопик, наблюдаемый на глубине 5 мм, отсутствует на глубине 50 мм, тогда как гамма-квант с энергией 662 кэВ присутствует на обеих глубинах, но значительно ослаблен на глубине 50 мм по сравнению с глубиной 5 мм примерно на 50 %.

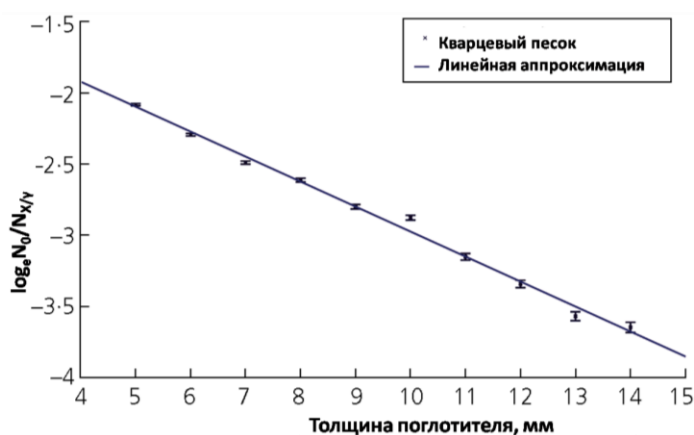


Рисунок. 24 График зависимости $\log_e N_0/N_{x/\gamma}$ от глубины d для точечного источника, погруженного в сухой кварцевый песок.

Оценки неопределенности, связанные с определением глубины залегания источника на основе этих калибровочных данных, показывают, что оценки глубины могут быть сделаны с точностью до ± 1 мм. Недостатком данного исследования является уменьшение амплитуды рентгеновского фотопика при увеличении толщины поглотителя, что приводит к неприменимости этого метода при больших толщинах поглотителя.

Наилучшим из разработанных к настоящему времени методов определения геометрического типа источников радиоактивного загрязнения является анализ в измеренном аппаратурном спектре соотношения детектируемых рассеянной и нерассеянной компонент излучения гамма-источника. При этом наиболее перспективным представляется анализ рассеянной части спектра в области так называемой комптоновской долины, которая соответствует зоне между пиком полного поглощения и правым краем комптоновского распределения (рис.25) [28-29].

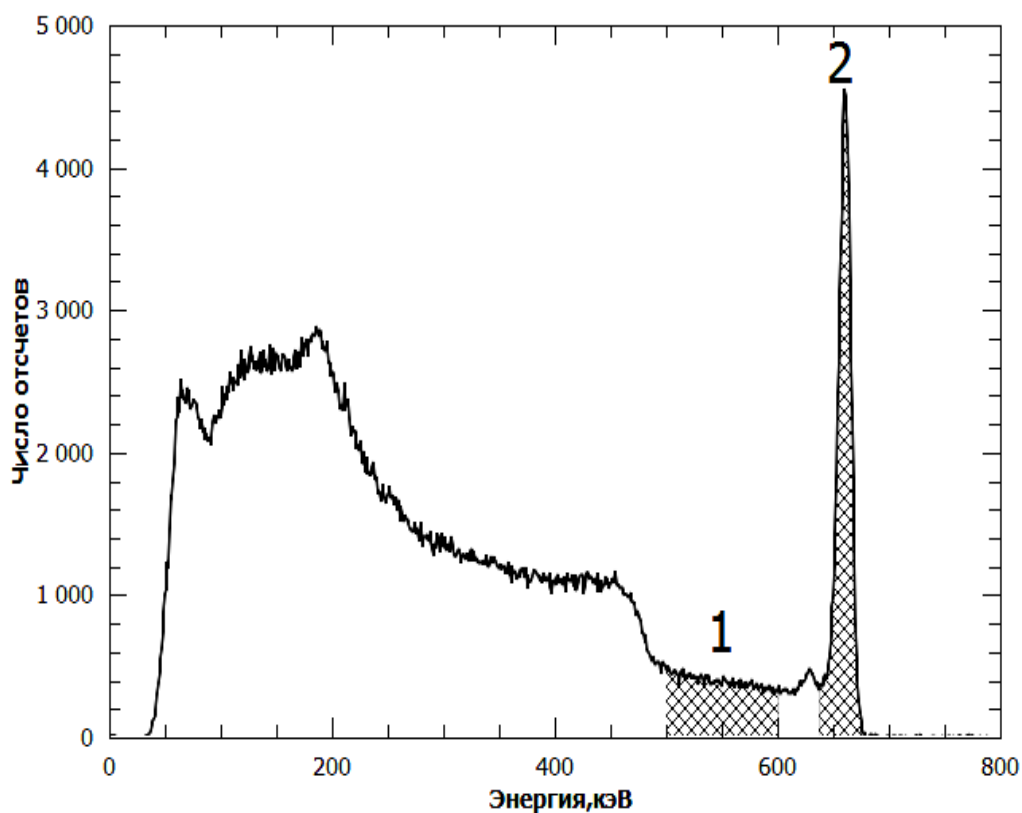
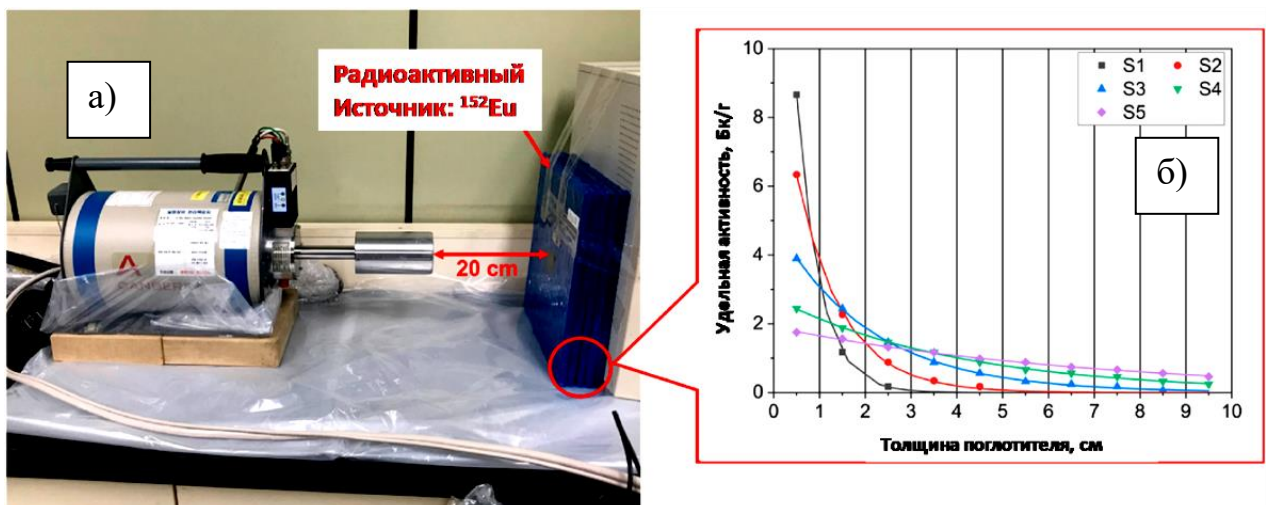


Рисунок 25. Область комптоновской долины (1) и пика полного поглощения (2) на примере спектра ^{137}Cs , измеренного детектором гамма - излучения на основе сжатого ксенона.

Для моноэнергетического источника импульсы в области комптоновской долины возникают либо в результате многократного комптоновского рассеяния, либо в результате взаимодействий с полной потерей энергии фотонами, которые подверглись рассеянию на небольшие углы (в материале источника или в промежуточных материалах) перед тем, как попасть в детектор. Нерассеянные фотоны моноэнергетического источника не могут образовывать импульсы в комптоновской долине в результате однократного взаимодействия в детекторе. В более сложных спектрах эта часть спектра может содержать импульсы, образованные в результате комптоновского рассеяния фотонов более высоких энергий.

Исследование подобного рода были выполнены с помощью полупроводникового гамма-спектрометра на основе чистого германия (HPGe) [30]. В данном эксперименте в качестве поглотителя использовались несколько слоев бетонных плит, источником гамма-квантов являлся изотоп ^{152}Eu (рис.26).



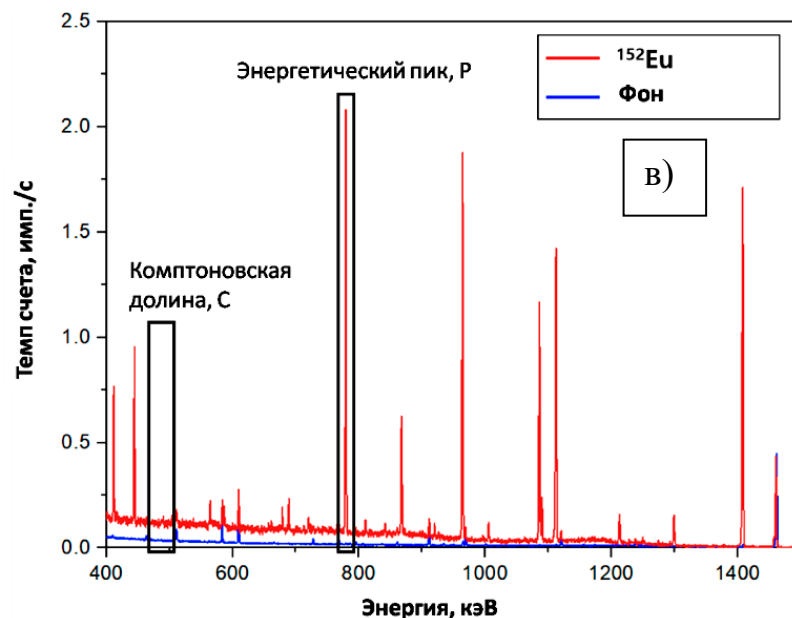


Рисунок.26 а) Гамма-спектрометр HPGe и бетонные плитки, б) полученный график зависимости удельной активности от толщины поглотителя (бетонные плитки), в) гамма-спектр, полученный от радионуклида ^{152}Eu с помощью HPGe.

С целью определения глубины залегания источника использовался также метод отношения площади пика полного поглощения к площади комптоновской долины, который сравнивает темп счета пика полного поглощения, измеренного портативным HPGe, и темп счета комптоновской долины. Применяя результаты этого исследования, можно оценить глубину залегания источника гамма-излучения с относительной погрешностью порядка 20%. Недостатками этого исследования является дороговизна детектора на основе кристалла HPGe и необходимость его охлаждения во время эксплуатации.

3.2 Моделирование эксперимента по определению глубины залегания гамма-источников с помощью ксенонового гамма-спектрометра

Моделирование отклика КГС проводилось методом Монте-Карло с использованием пакета библиотек Geant4 с учетом конструктивных характеристик детектора и геометрии эксперимента. В модели были использованы керамические плитки размером 20x15x0,65 см, в количестве 12 штук, которые располагались перед торцом КГС. Использовался гамма-источник ^{137}Cs с энергией 662 кэВ, который находился на расстоянии 26 см от торца детектора (рис.27).

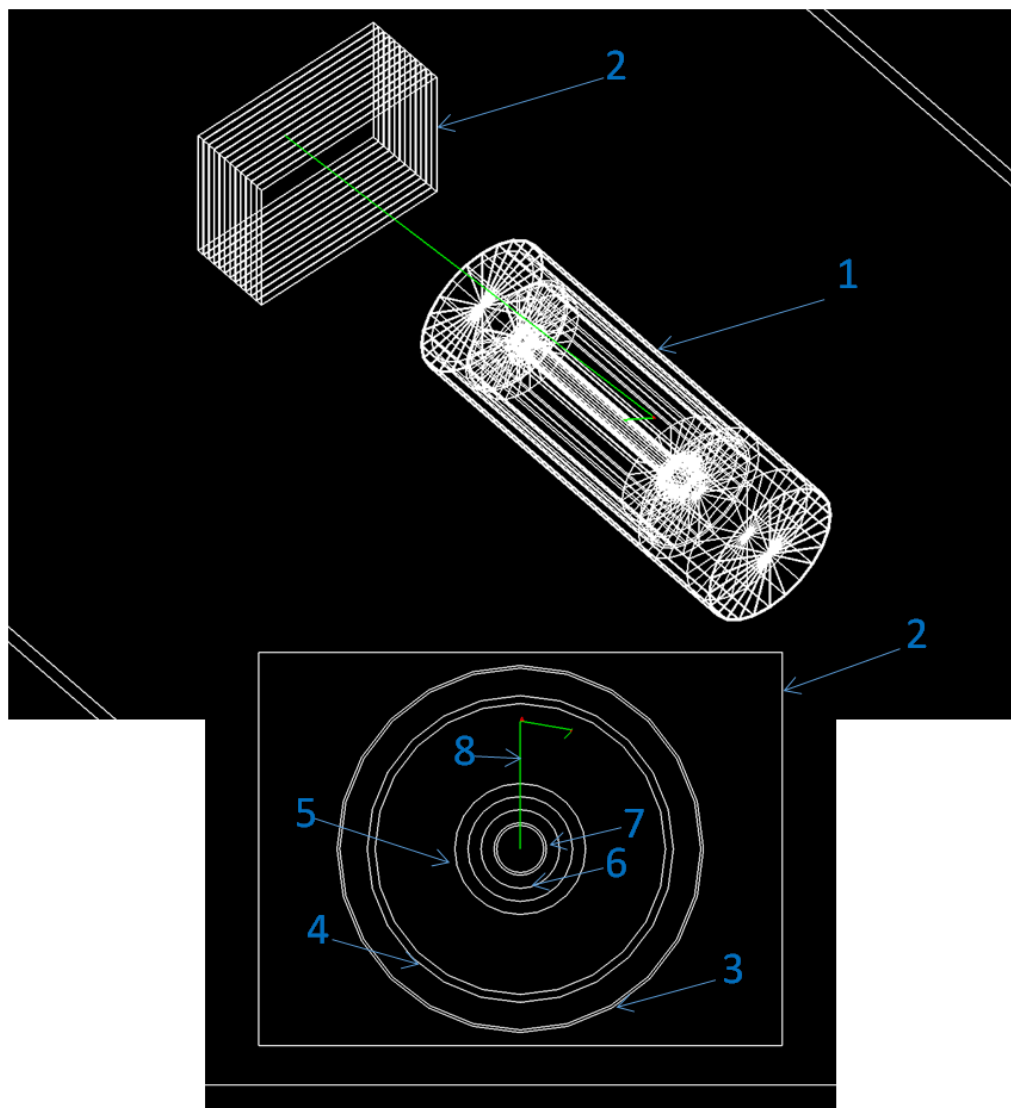


Рисунок 27. Геометрия эксперимента: 1 – КГС, 2 – керамические пластинки, 3 – защитный кожух детектора, 4 – стальной корпус ионизационной камеры, 5 – металлокерамический гермоввод, 6 – экранирующая сетка, 7 – анод, 8 – трек гамма-кванта с энергией 662 кэВ.

На рис.27 представлены результаты моделирования взаимодействия одного из гамма-квантов с энергией 662 кэВ с рабочим веществом гамма-детектора.

В результате моделирования построен гамма-спектр, рассчитанный для источника ^{137}Cs , который был наложен на спектр гамма-излучения, полученный при измерениях источника ^{137}Cs КГС (рис.28).

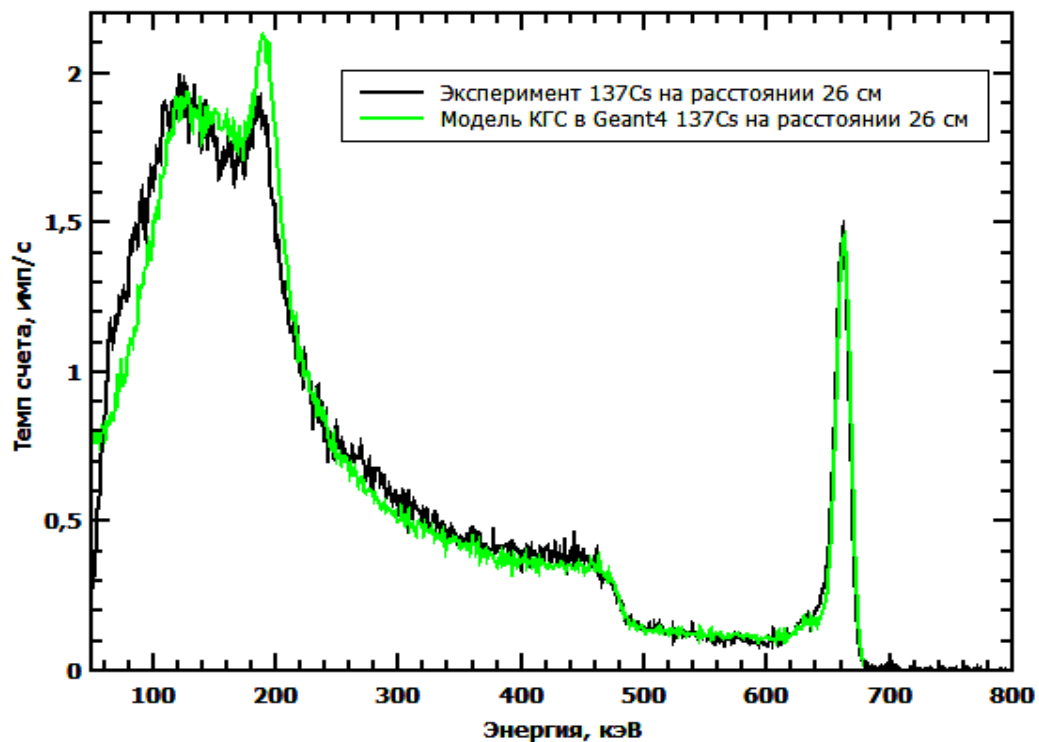


Рисунок 28. Энергетический спектр, рассчитанный для источника ^{137}Cs , расположенного на расстоянии 26 см от торца детектора в модели и в реальных измерениях (поглотитель отсутствует).

На рис.29 представлены фотопики с энергией 662 кэВ для сравнения модели и реальных измерений.

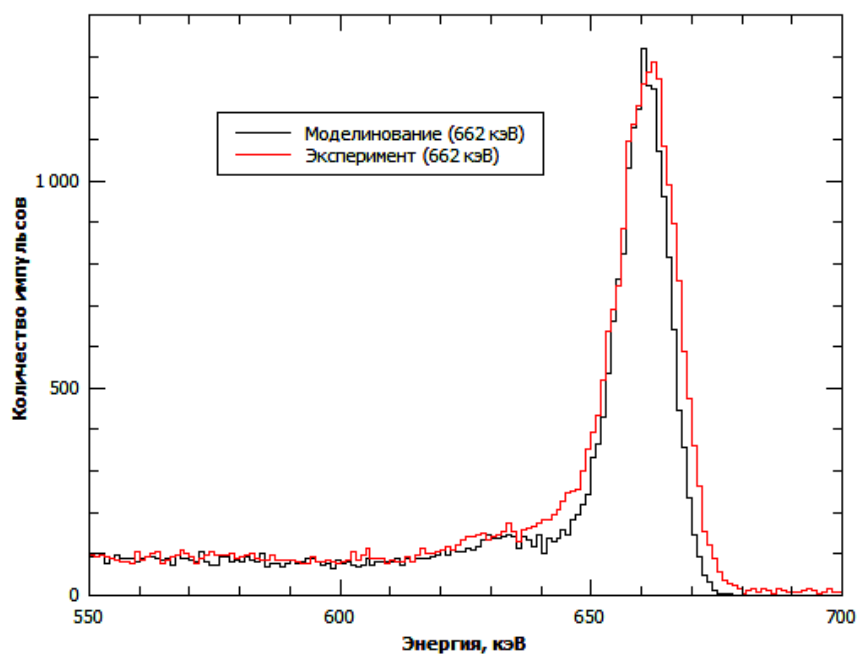


Рисунок 29. Пики полного поглощения, полученные при моделировании в Geant4 и реальных измерениях.

Анализ спектров, представленных на рис. 29 показал, что эффективности регистрации двух пиков полного поглощения отличаются на 10%.

Рисунок 30 иллюстрирует комптоновские долины и пики полного поглощения гамма-квантов с энергией 662 кэВ при прохождении через различные слои поглотителя (керамика).

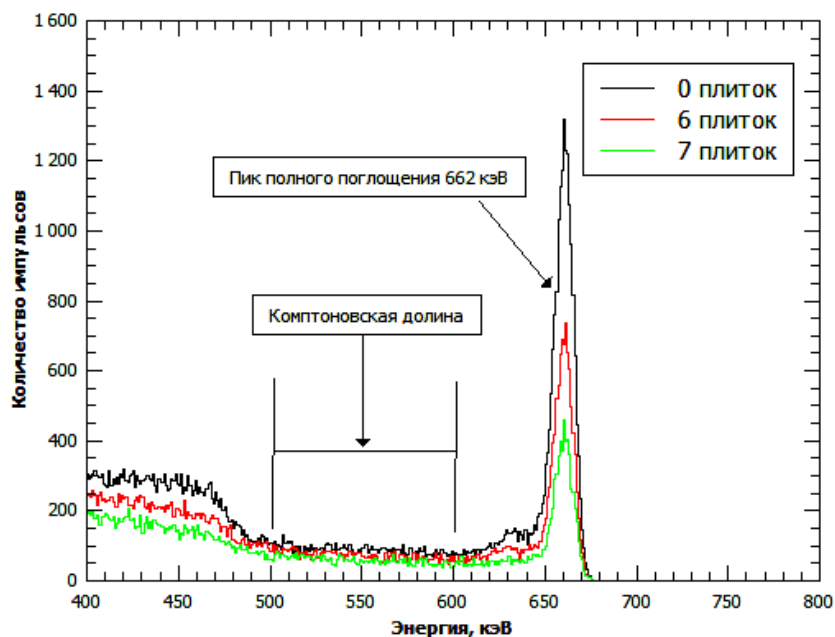


Рисунок 30. Гамма-спектр ^{137}Cs , представляющий пики полного поглощения и комптоновские долины.

По полученным результатам моделирования были построены графики зависимости темпа счета площади пика полного поглощения, площади комптоновской долины и зависимости отношения площади пика полного поглощения к площади комптоновской долины от толщины керамических плиток (рис.31).

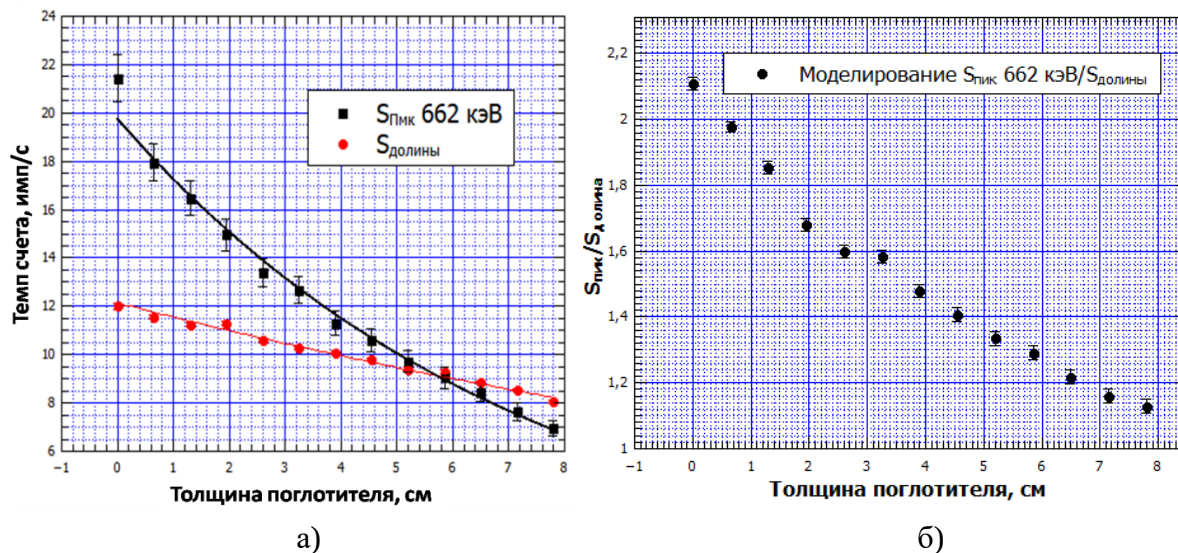


Рисунок 31. Графики зависимости а) темп счета площади комптоновской долины от толщины поглотителя, б) отношение площади пика полного поглощения к площади долины от толщины поглотителя.

Видно, что при увеличении толщины поглотителя значение отношения площади пика полного поглощения к площади долины падает (рис.31б)).

На рис.32 представлены результаты моделирования с поглотителем в виде алюминия, который облучался гамма-квантами с энергией 662 кэВ.

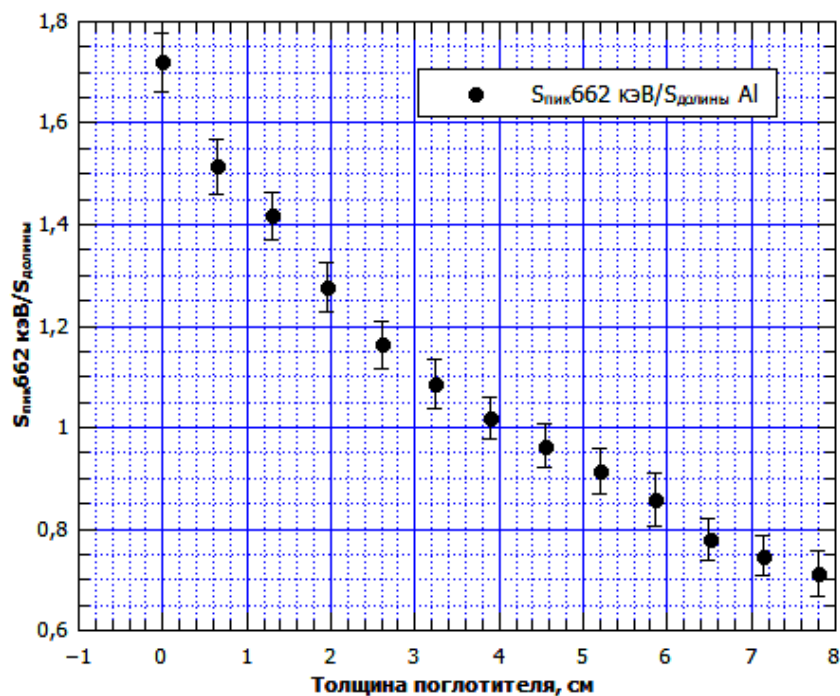


Рисунок 32. Графики зависимости отношения площади пика полного поглощения к площади долины от толщины поглотителя (алюминий)

Результаты моделирования убедительно демонстрируют возможность определения глубины залегания радиоактивных источников путем измерения гамма-спектров ксеноновым гамма-спектрометром.

3.3 Экспериментальное определение глубины залегания гамма-источников для различных поглотителей

Для исследования поглощения гамма-квантов для керамических плиток были проведены измерения ксеноновым гамма-спектрометром спектров от различных гамма-источников. Химический состав керамической плитки был определен с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра (табл.5) [31].

Таблица 5. Химический состав керамической плитки.

Компоненты	Отн. Масса
Диоксид кремния	0,6639
Оксид кальция	0,0364
Оксид алюминия	0,1814
Оксид железа	0,0379
Оксид магния	0,036
Оксид калия	0,0339

Данные химического состава керамики были введены в программу XMuDat [32], которая рассчитала значения коэффициента поглощения для данной керамики (рис.34).

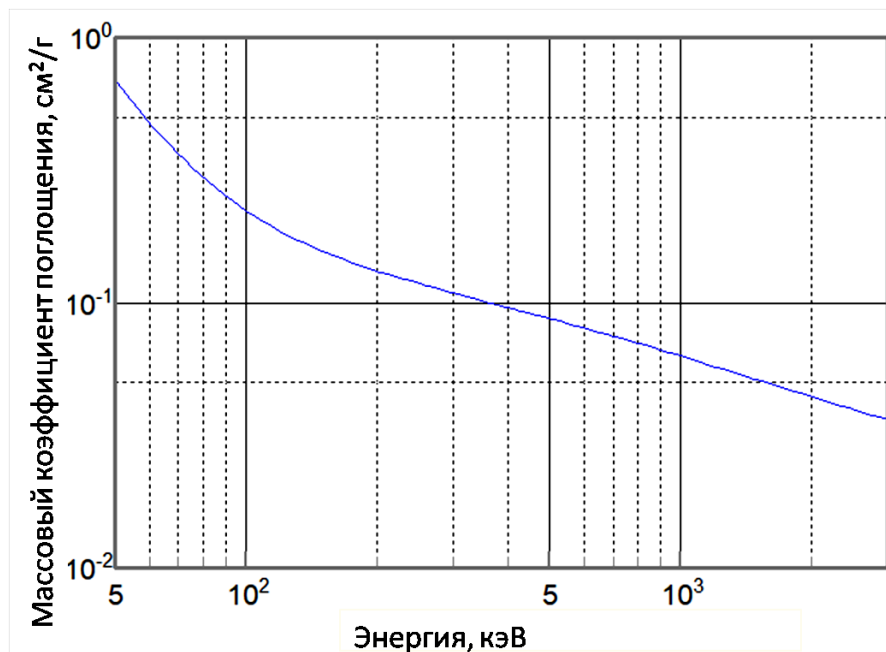


Рисунок 34. Зависимость массового коэффициента поглощения от энергии гамма-квантов.

Были проведены экспериментальные исследования, где использовались керамические плитки размером 20x15x0,65 см, в количестве 12 штук, которые располагались перед торцом КГС. Использовались гамма-источники типа ОСГИ (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba и ^{152}Eu), которые находились перед керамическими плитками (рис.35).

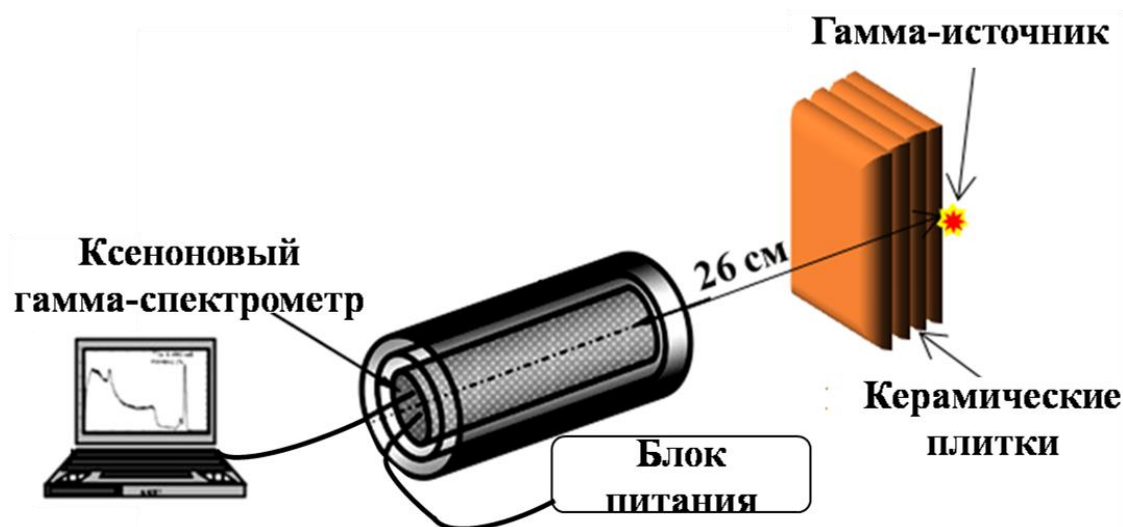


Рисунок 35. Схема эксперимента.

Перед каждым экспериментом измерялось фоновое гамма-излучение в лаборатории, которое учитывалось при обработке экспериментальных данных. Один из спектров фона показан на рис.36, на котором отчетливо

видны характерные гамма-линии от естественных радиоактивных изотопов:

^{40}K (1460 кэВ) и ^{228}Th (1600 и 2614 кэВ).

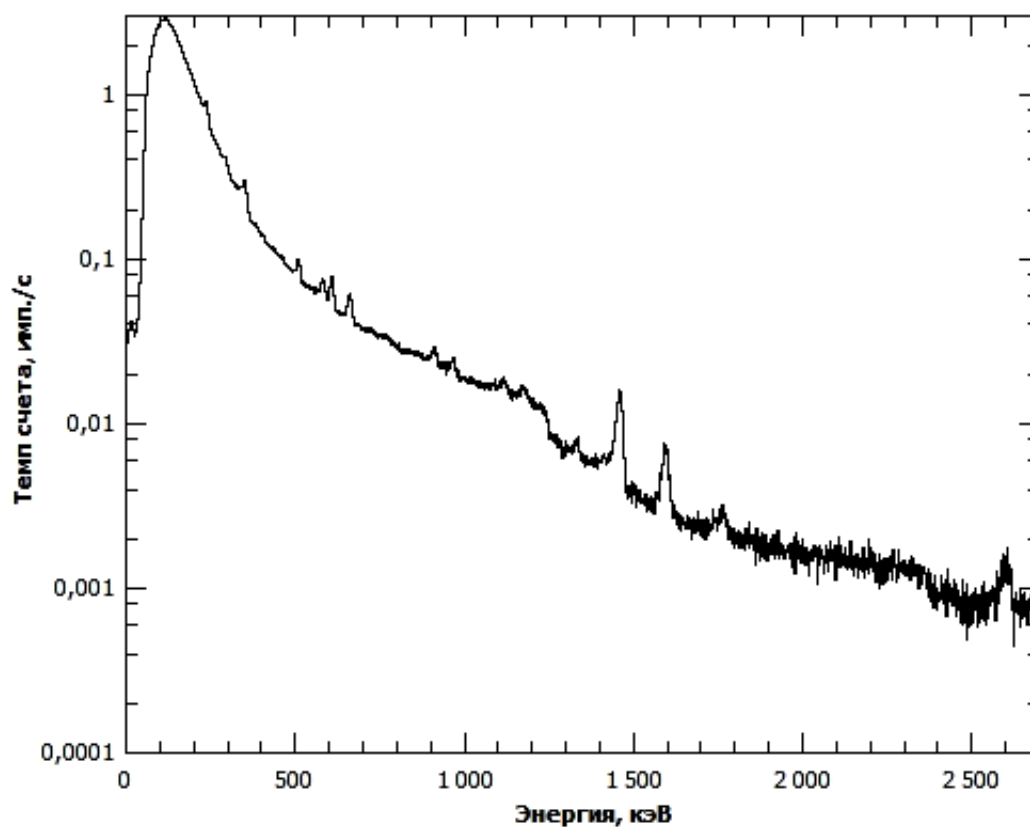


Рисунок 36. Спектр фонового гамма-излучения в лаборатории.

На рис. 37 - 40 приведены энергетические спектры гамма-источников ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba и ^{152}Eu , измеренные КГС, при наличии керамических плиток, где спектр фонового гамма-излучения был вычтен.

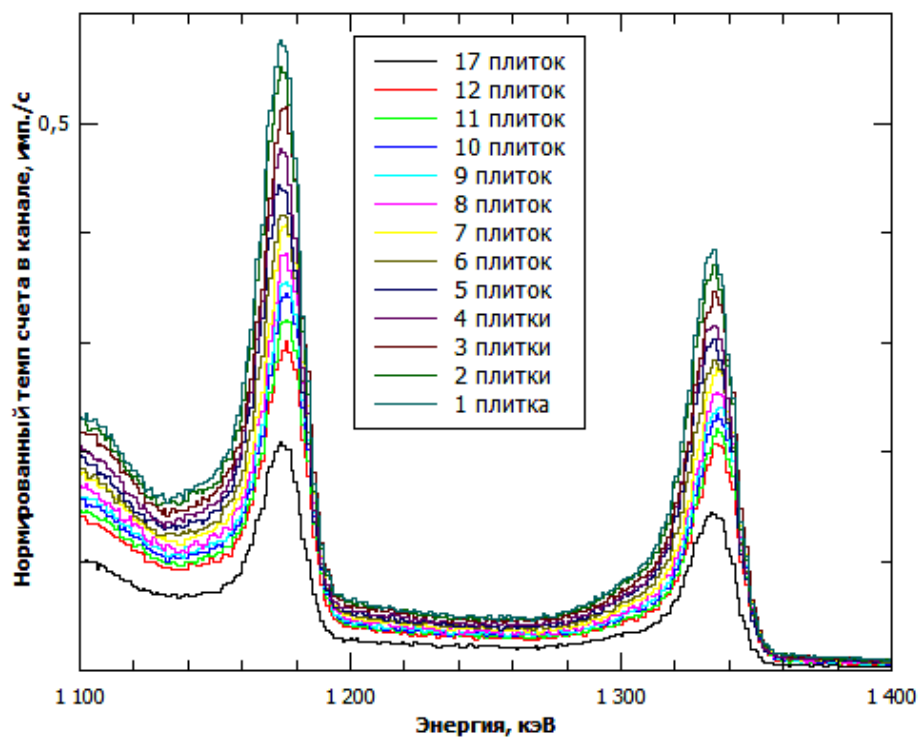


Рисунок 37. Спектры от источника ^{60}Co с поглотителями (керамика) различной толщины.

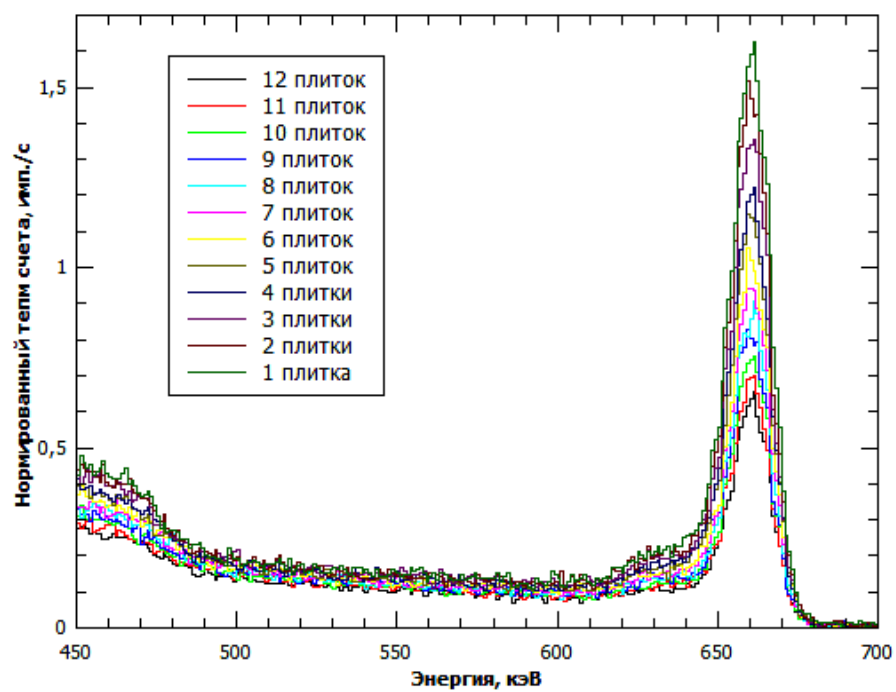


Рисунок 38. Спектры от источника ^{137}Cs с поглотителями (керамика) различной толщины.

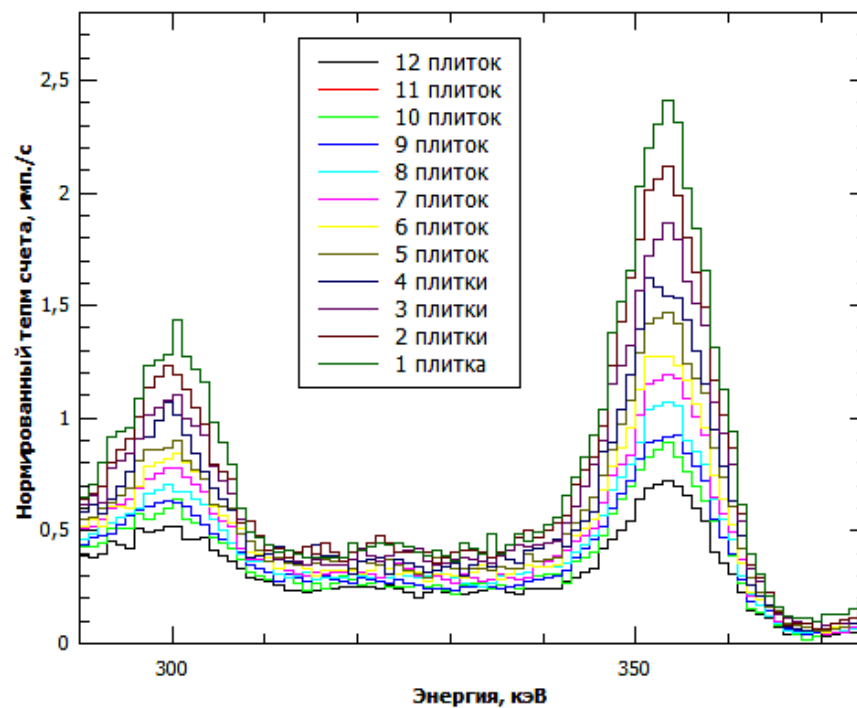


Рисунок 39. Спектры от источника ^{133}Ba с поглотителями (керамика) различной толщины.

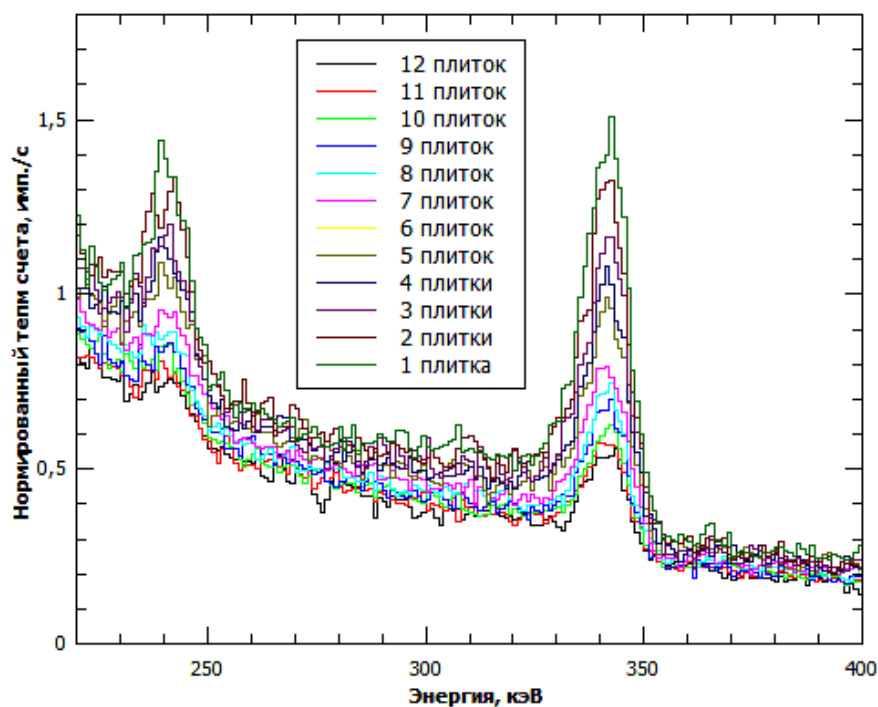


Рисунок 40. Спектры от источника ^{152}Eu с поглотителями (керамика) различной толщины.

С увеличением количества керамических плиток отчетливо наблюдается относительное увеличение площади комптоновской долины, которая выбиралась в диапазоне энергий гамма-квантов для источника ^{60}Co

от 1200 до 1280 кэВ, ^{137}Cs от 500 до 600 кэВ, ^{133}Ba от 310 до 335 кэВ и ^{152}Eu от 255 до 325 кэВ.

В результате обработки экспериментальных данных были получены коэффициенты поглощения для поглотителя в виде керамики в зависимости от энергии гамма-квантов (рис.41).

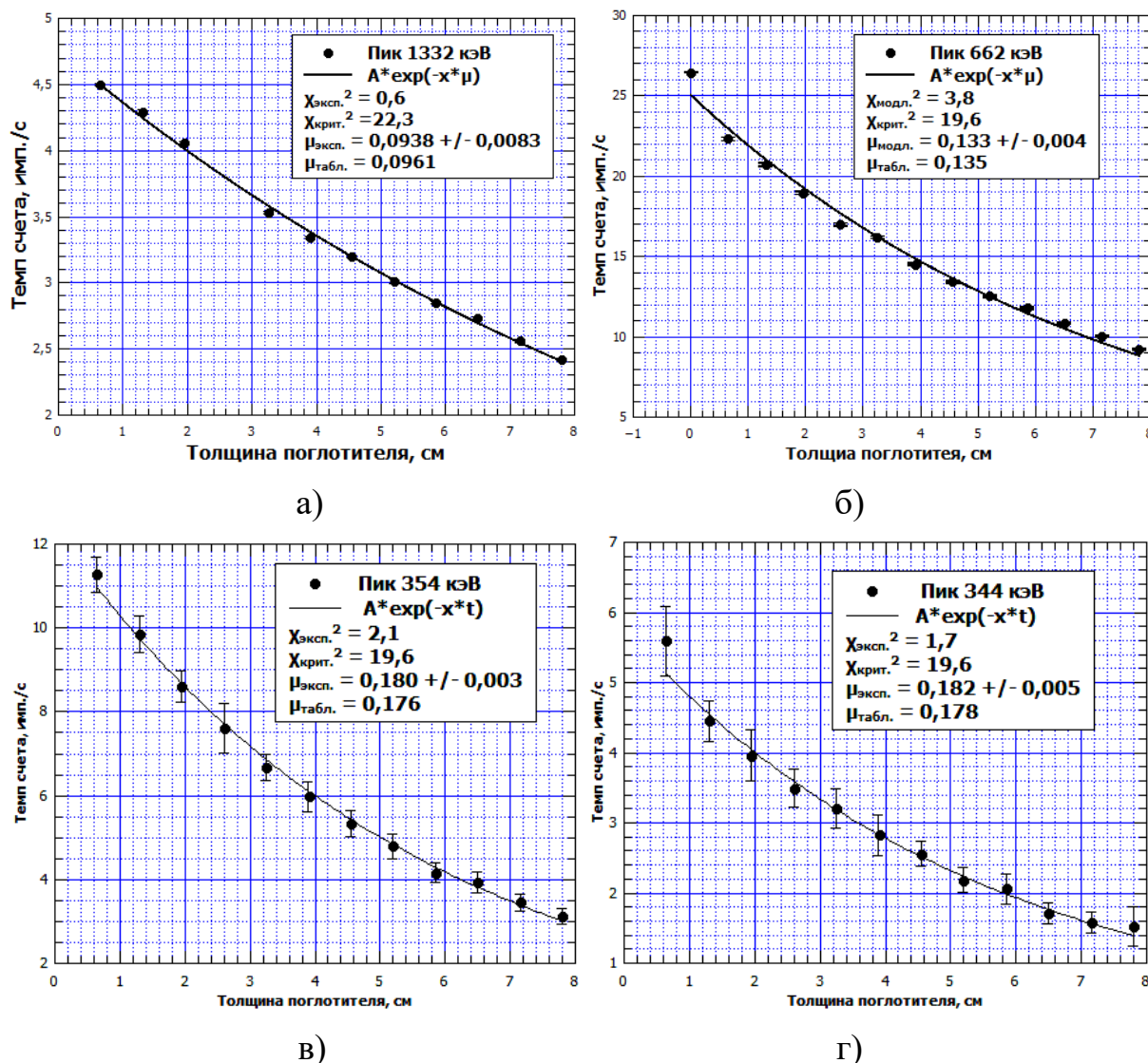


Рисунок 41. Графики зависимости темпа счета площади пика полного поглощения от толщины поглотителя (керамика) для различных источников гамма-квантов – а) ^{60}Co , б) ^{137}Cs , в) ^{133}Ba , г) ^{152}Eu .

По результатам эксперимента (рис.41) были определены коэффициенты поглощения для керамической плитки, которые совпадают в пределах погрешностей с табличными значениями, полученными с помощью программы XMuDat (табл.6).

Таблица 6. Коэффициенты поглощения для керамических плиток при разных энергиях гамма-линий.

Гамма-источник	Энергия, кэВ	Табличные значение коэффициента поглощения керамики, см ⁻¹	Экспериментальные значение коэффициента поглощения керамики, см ⁻¹
⁶⁰ Co	1332	0,0961	0,094 ± 0,008
¹³⁷ Cs	662	0,1350	0,135 ± 0,004
¹³³ Ba	354	0,1760	0,180 ± 0,003
¹⁵² Eu	344	0,1780	0,182 ± 0,005

В каждом из спектров были вычислены темпы счета площадей пиков полного поглощения ($S_{\text{пик}}$) и комптоновской долины ($S_{\text{долины}}$) для различных гамма-источников (рис.42).

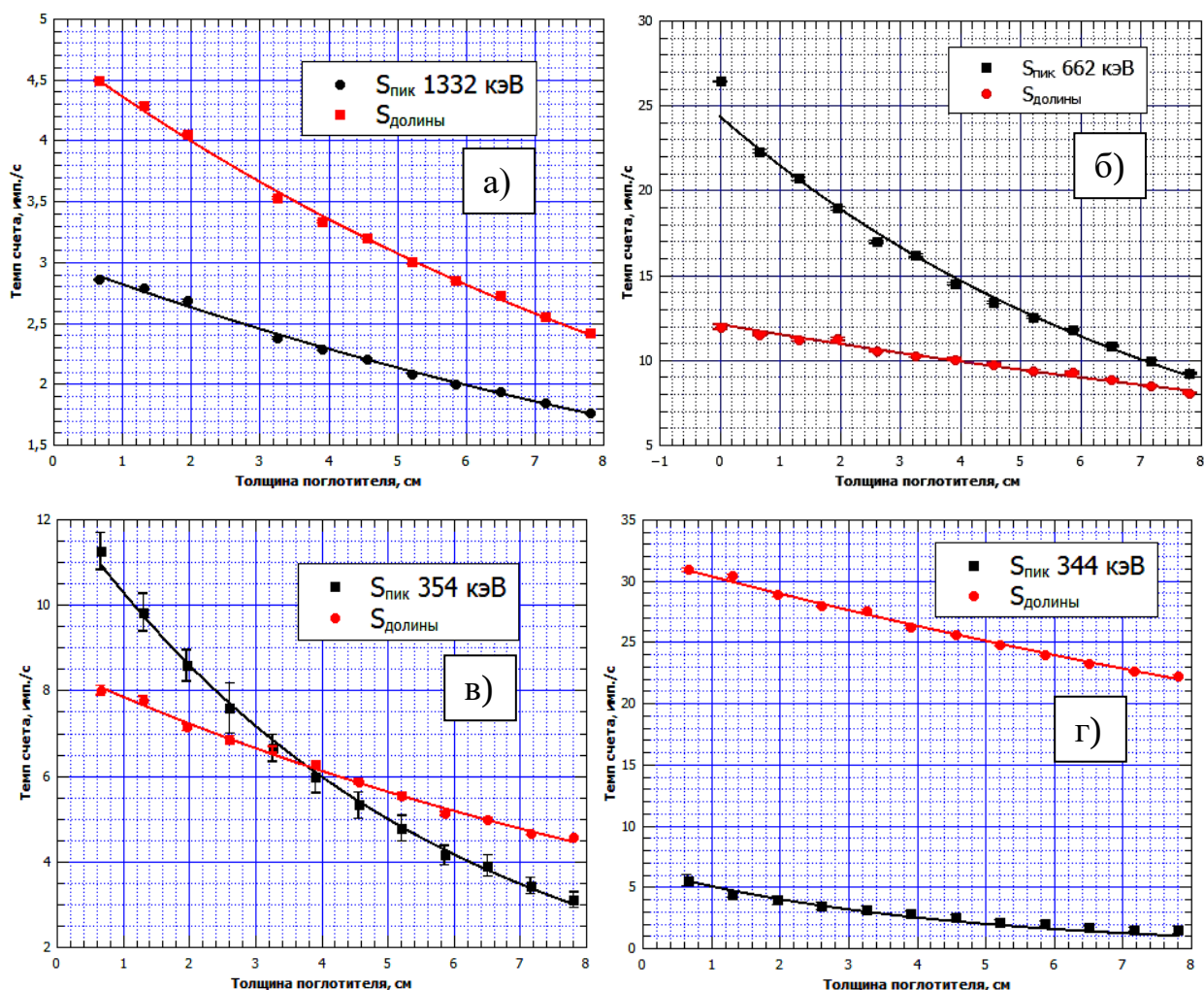


Рисунок 42. Зависимость площадей комптоновской долины $S_{\text{долины}}$ и пика полного поглощения $S_{\text{пик}}$ от толщины поглотителя (керамика) для различных энергий гамма-источника) а) ⁶⁰Co, б) ¹³⁷Cs, в) ¹³³Ba, г) ¹⁵²Eu.

Были определены отношения темпов счета площадей пиков полного поглощения и комптоновской долины ($S_{\text{пик}}/S_{\text{долины}}$) в зависимости от толщины керамических плиток (рис.43). Площадь комптоновской долины вычислялась в выше указанных диапазонах, а пики полного поглощения в результате аппроксимации распределением Гаусса.

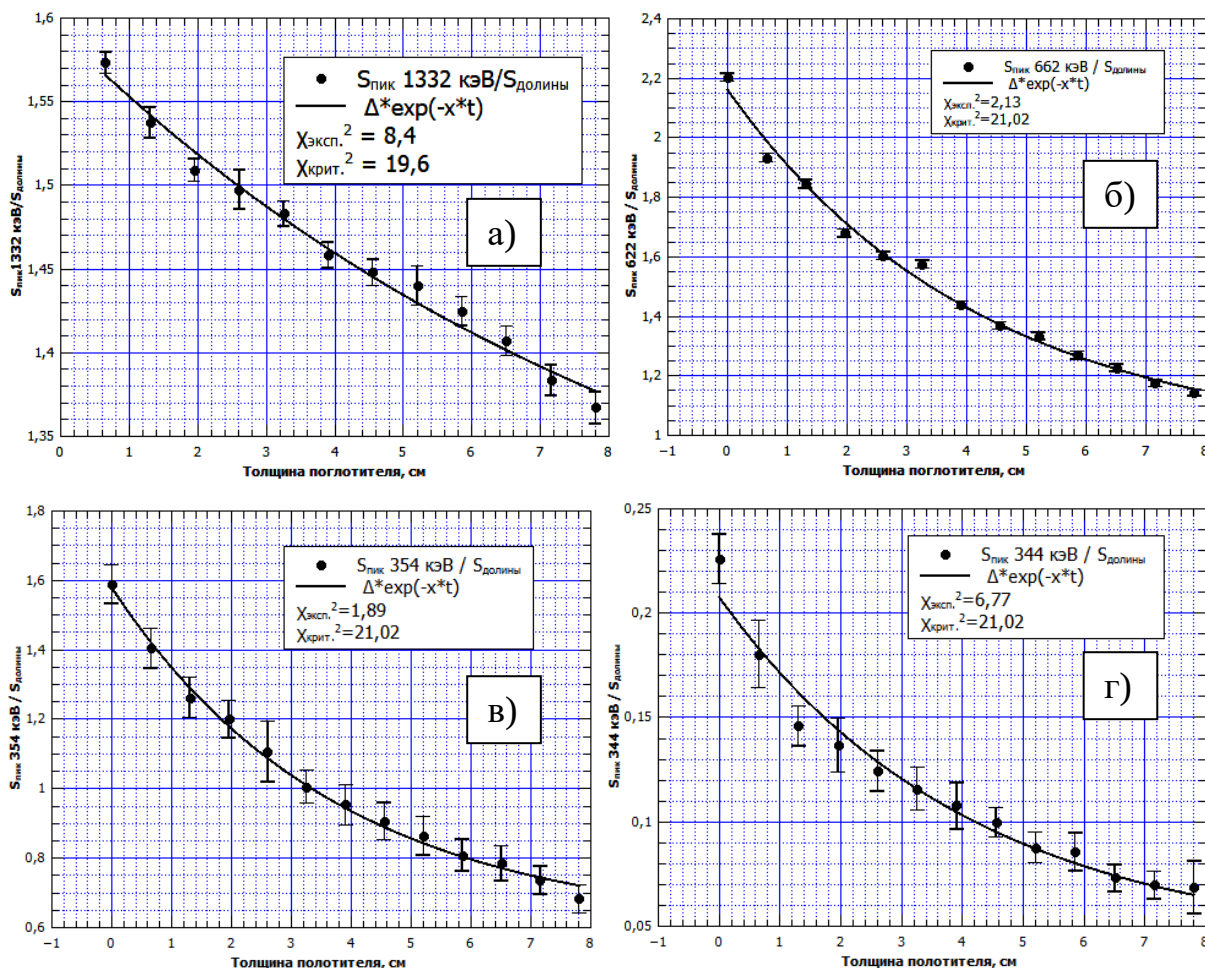


Рисунок 43. Зависимость отношения площади пика полного поглощения и комптоновской долины $S_{\text{пик}}/S_{\text{долины}}$ от толщины поглотителя (керамика) для различных энергий гамма-источников а) ^{60}Co , б) ^{137}Cs , в) ^{133}Ba , г) ^{152}Eu .

Для аппроксимации точек в графиках на рис.40 использовалась зависимость:

$$y = \Delta \cdot e^{-\chi \cdot t}, \quad (2)$$

где Δ - константа, определяющая отношение темпов счета площади пика полного поглощения и темпов счета площади комптоновской долины для нулевой толщины поглотителя, t - коэффициент ослабления потоков гамма-

квантов, которые составляют спектр в области пика полного поглощения и комптоновской долины, x - толщина поглотителя.

Погрешности $S_{\text{пик}} / S_{\text{долины}}$ вычислялись по формуле:

$$E_{\text{err}} = \sqrt{\left(S_{\text{пик}}^{\text{err}} / S_{\text{долины}}\right)^2 + \left(S_{\text{пик}} \cdot S_{\text{долины}}^{\text{err}} / (S)^2\right)^2}, \quad (3)$$

где $S_{\text{пик}}^{\text{err}}$ и $S_{\text{долины}}^{\text{err}}$ - погрешности площади пика полного поглощения и площади комптоновской долины, $S_{\text{пик}}$ и $S_{\text{долины}}$ площади пика полного поглощения и комптоновской долины.

Проведено сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования методом Монте-Карло с использованием пакета библиотек Geant4 с учетом конструктивных характеристик КГС, соответствующих реальной измерительной установке. В моделировании использовались гамма-кванты с энергией 662 кэВ. По полученным результатам моделирования был построен график зависимости отношения площади пика полного поглощения к площади комптоновской долины (рис.44).

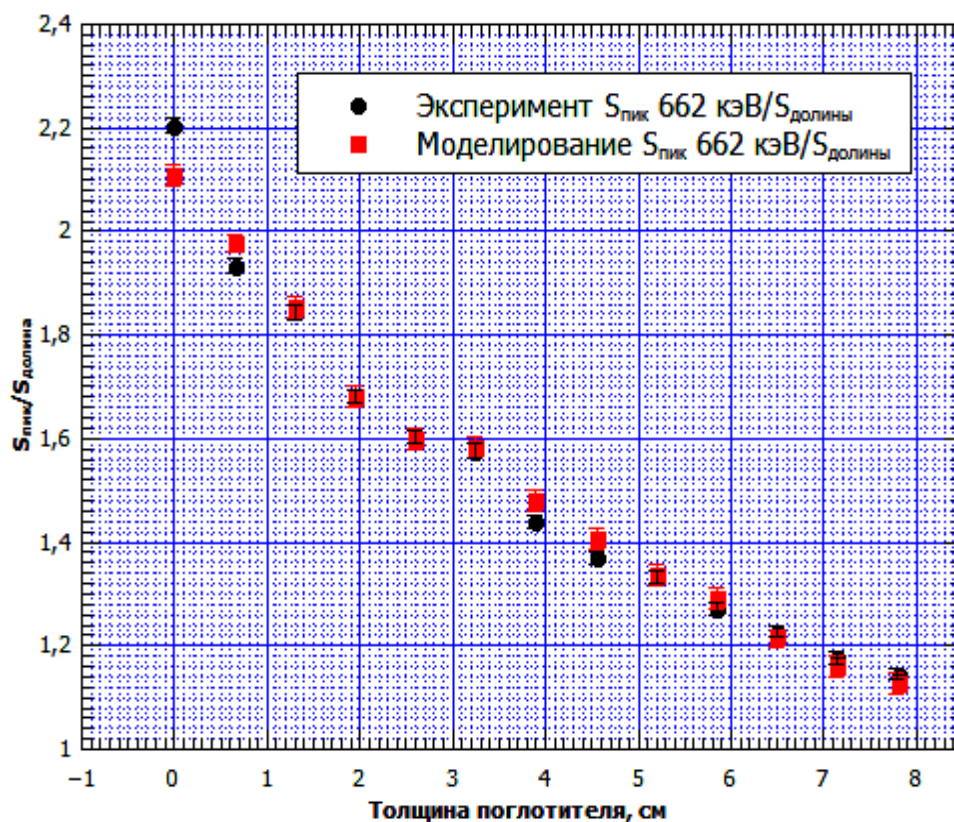


Рисунок 44. График зависимости отношения темпа счета площади пика полного поглощения и темпа счета площади комптоновской долины от толщины поглотителя (керамика) для энергии гамма-квантов 662 кэВ.

Из рис.44 видно, что экспериментальные результаты и результаты, полученные с использованием метода Монте-Карло в Geant4 совпадают в пределах погрешностей.

На рис.45 представлены графики отношения темпа счета площади пика полного поглощения и площади комптоновской долины $S_{\text{пик}} / S_{\text{долина}}$ в зависимости от толщины различных поглотителей для энергии гамма-квантов 662 кэВ.

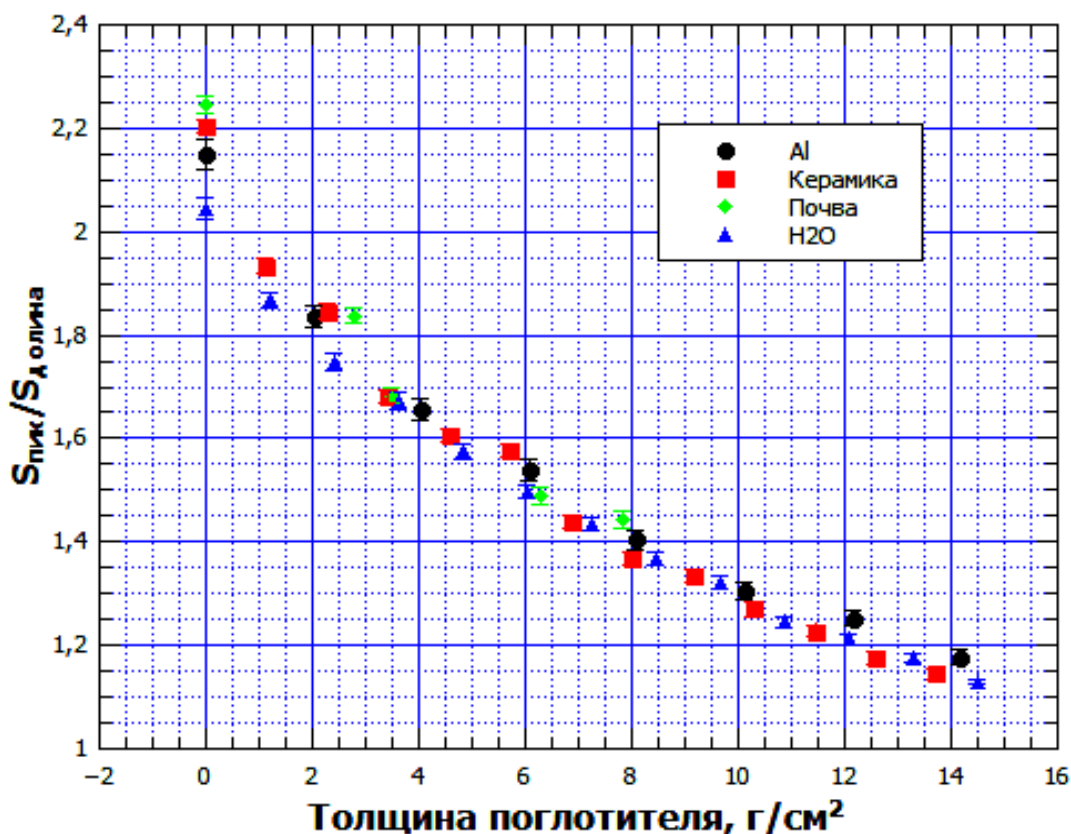


Рисунок 45. Графики зависимости отношения площади пика полного поглощения и площади долины от толщины поглотителя для различных поглотителей (керамика, алюминий, почва, вода) для энергии гамма-квантов 662 кэВ.

Для расчета погрешности глубины x источника используется формула (3) и её дифференциал:

$$\begin{aligned} dy &= -\Delta \cdot t \cdot e^{-x \cdot t} dx \\ dx &= -\frac{dy}{\Delta \cdot t} \cdot e^{x \cdot t} \end{aligned} \quad (4)$$

Погрешность глубины dx зависит не только от статистической погрешности dy отношения пик-долина, но и от самого значения величины x .

Из-за особенностей зависимости (3) наклон касательной к экспоненте при больших глубинах x будет стремиться к нулю, что приводит к росту погрешности. В качестве альтернативы можно воспользоваться модифицированной методикой для определения глубины из статьи [33], в которой авторы после некоторых преобразований получают линейную зависимость обратного нормированного отношения пик-долина от толщины поглотителя x . В результате погрешность вычисляется по более простой формуле:

$$dx = \frac{dy}{A}, \quad (5)$$

где A константа линейной зависимости $y = A \cdot x + B$, y – отношения экспериментального значения пик-долина при глубине $x = 0$ к текущему значению пик-долина на глубине x (рис.46).

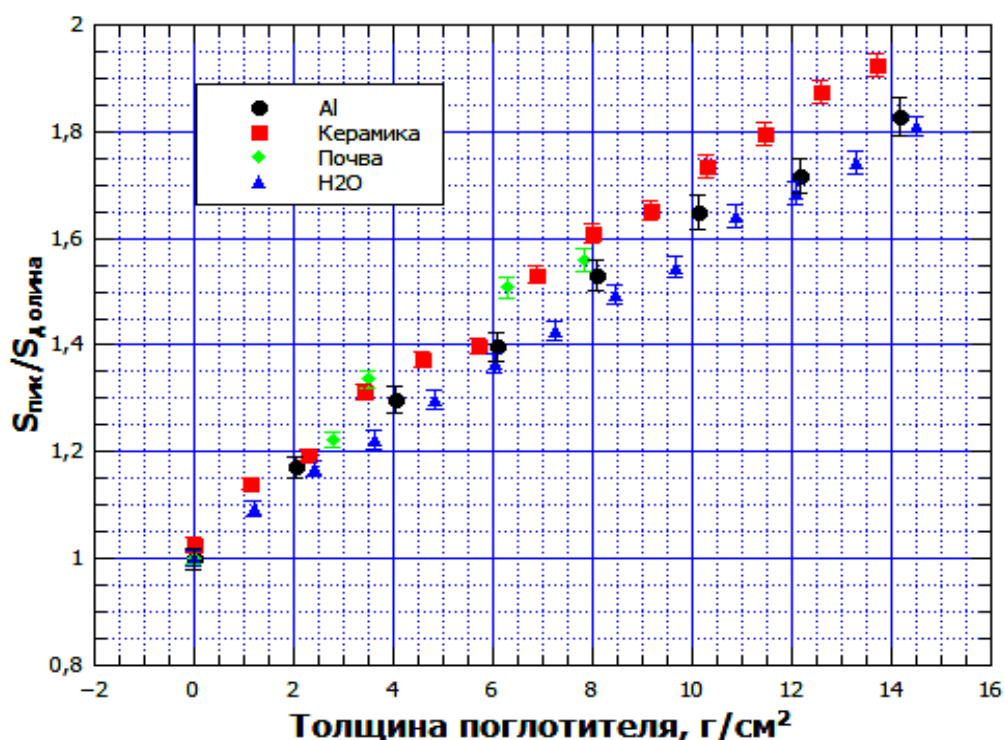


Рисунок 46. Графики экспериментальных зависимостей обратного нормированного отношения пик-долина от толщины поглотителя для различных материалов (керамика, алюминий, почва, вода) для энергии гамма-квантов 662 кэВ.

В табл.7 представлены результаты расчетов точности определения глубины залегания радиоактивного источника ^{137}Cs активностью 100 кБк за время измерения 60 минут для различных материалов.

Таблица 7. Точность определения глубины залегания источника ^{137}Cs в различных материалах.

Материал	Глубина, см	Точность глубины, см	Относительная погрешность, %
Алюминий	5,3	0,58	10
Керамика	7,8	0,32	4,2
Почва	20,0	0,35	1,8
Вода	12,0	0,33	2,7

По результатам экспериментов с ксеноновым гамма-спектрометром с рабочим объемом 2000 см^3 и гамма-источниками ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu , располагавшимися за различными поглотителями, удалось продемонстрировать, что представленный метод с использованием отношения темпа счета площади пика полного поглощения и площади комптоновской долины позволяет определять активность, радионуклидный состав и глубину залегания радионуклидов. Погрешность значения глубины источника ^{137}Cs для керамики составляет 0,32 см при глубине 7,8 см, алюминия 0,58 см при глубине 5,3 см, почвы 0,35 см при глубине 20 см и воды 0,33 см при глубине 12 см. Данную методику можно применять при эксплуатации и выводе из эксплуатации атомных объектов, при проведении радиоэкологической разведки окружающей среды и оценке последствий атомных техногенных катастроф.

3.4 Определения местоположения и размеров области залегания радиоактивных источников

В экспериментах радиоактивный источник типа ОСГИ ^{137}Cs располагается напротив торца ксенонового гамма-детектора (КГД) на расстоянии 100 см от него. Для уменьшения регистрации вторичного рассеянного гамма-излучения, КГД помещается в цилиндрическую свинцовую защиту с толщиной стенки 3 см и диаметром 20 см. Схема и геометрия эксперимента приведены на рис.47.

Экспериментальные измерения проводятся в двух вариантах расположения КГД в коллиматоре:

- 1) Торец КГД установлен на краю коллиматора;
- 2) КГД углублён в цилиндрический коллиматор на 20 см, что позволяет экранировать КГД от рассеянных гамма-квантов, которые образуются при взаимодействии с поглотителем.

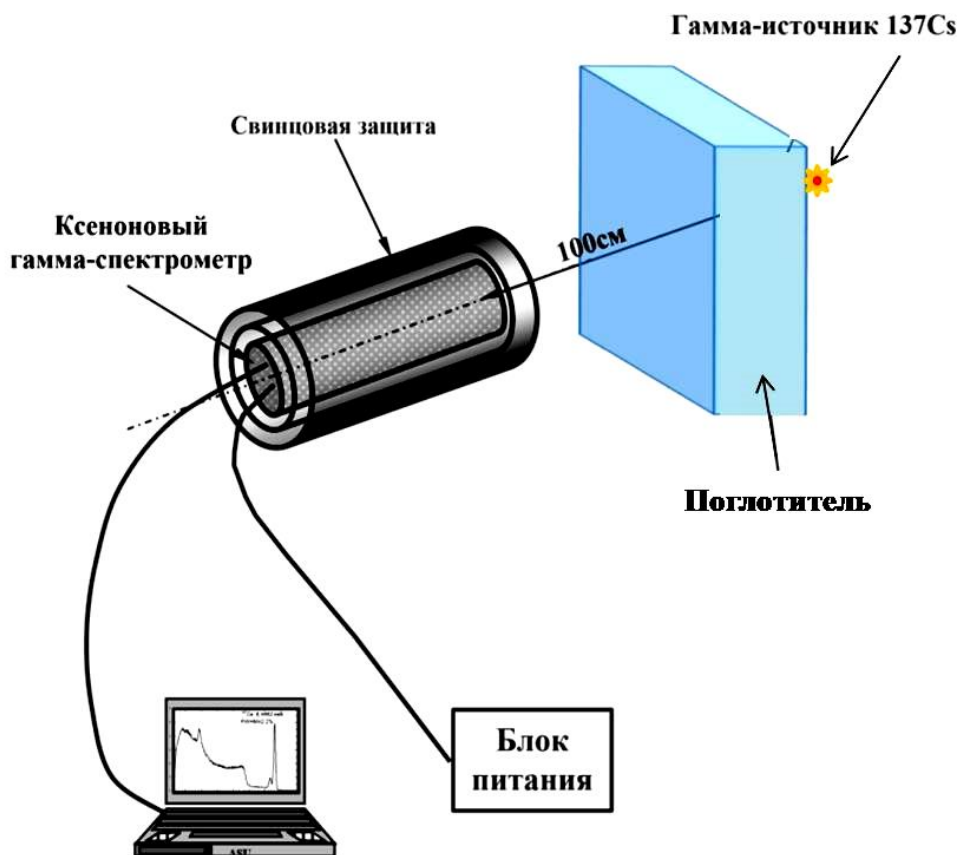


Рисунок 47. Схема эксперимента по определению местоположения и размеров области радиоактивного загрязнения с использованием КГД.

Для наблюдения изменений в форме гамма-спектра, особенно в области «комптоновской долины», использовался поглотитель из грунта (почва), который располагается между гамма-источником ^{137}Cs и КГД. Толщина поглотителя в экспериментах менялась и составляла 0 см (нет поглотителя), 5 см, 10 и 20 см. Активность используемого источника гамма-излучения ^{137}Cs составляла 1 МБк.

Перед началом измерений энергетических спектров от гамма-источников проводились калибровка энергетической шкалы гамма-спектрометра и измерение фона в лаборатории, который учитывался при обработке экспериментальных данных.

На рис.48 приведены энергетические спектры, измеренные КГД, при наличии грунта различной толщины. Приведен также спектр фонового гамма-излучения.

Более подробно показано изменение комптоновской долины в зависимости от толщины грунта (рис.48), а также приведены измеренные спектры от источника ^{137}Cs с вычтенным фоном и нормированные на площади пиков полного поглощения (рис.49). Отчетливо наблюдается относительное увеличение площади комптоновской долины с увеличением толщины поглощающего слоя. Комптоновская долина выбиралась в диапазоне энергий гамма-квантов от 500 до 600 кэВ.

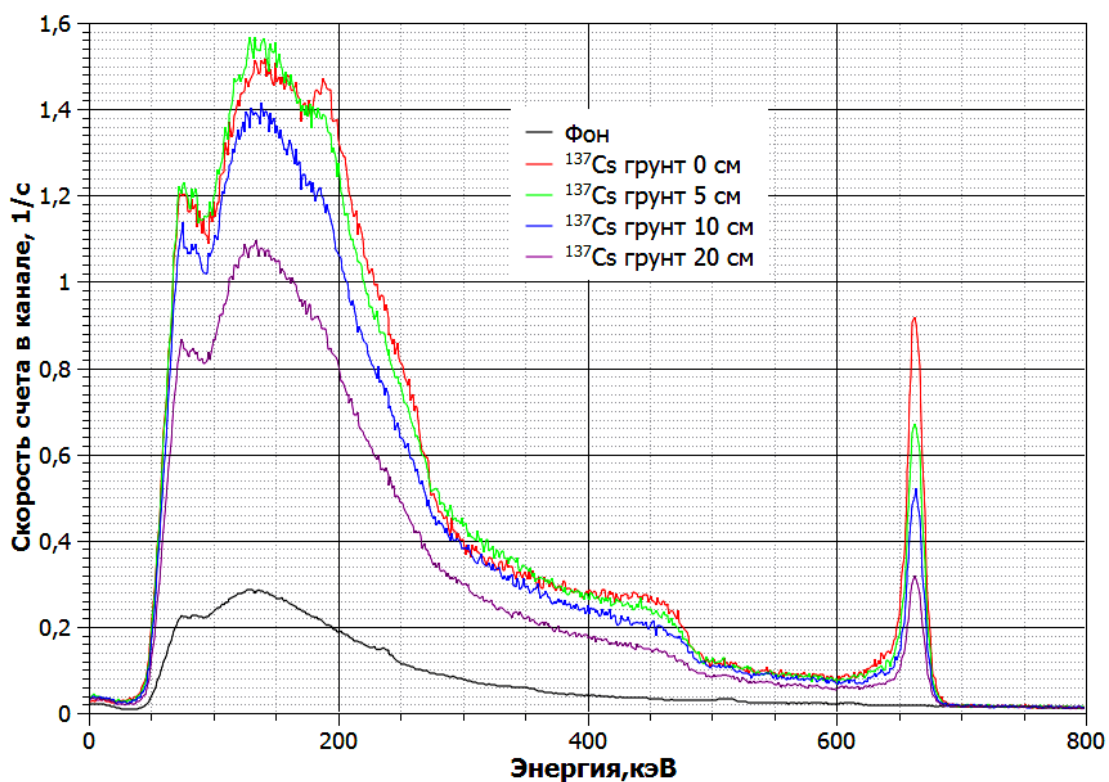


Рисунок 48. Спектры от источника ^{137}Cs с поглотителями (грунт) различной толщины и спектр фонового гамма-излучения.

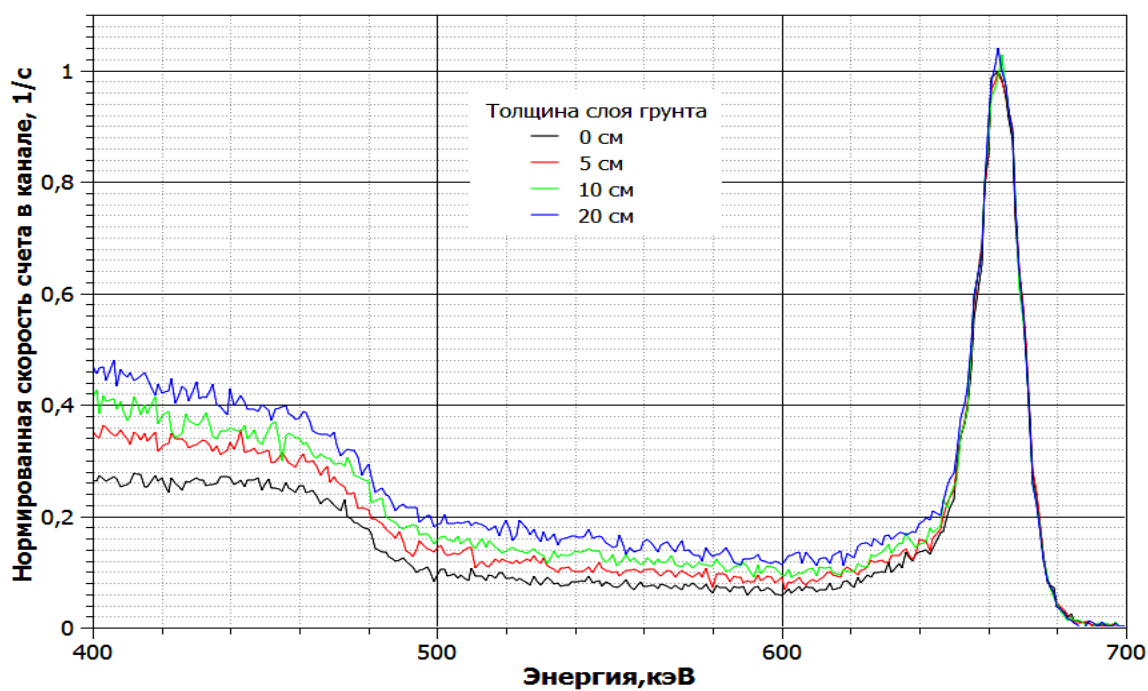


Рисунок 49. Изменение комптоновской долины в зависимости от толщины грунта.

В каждом из спектров были вычислены темпы счета площадей пиков полного поглощения ($S_{пик}$) и комптоновской долины ($S_{долины}$). Результаты этих расчётов показаны на рис.50.

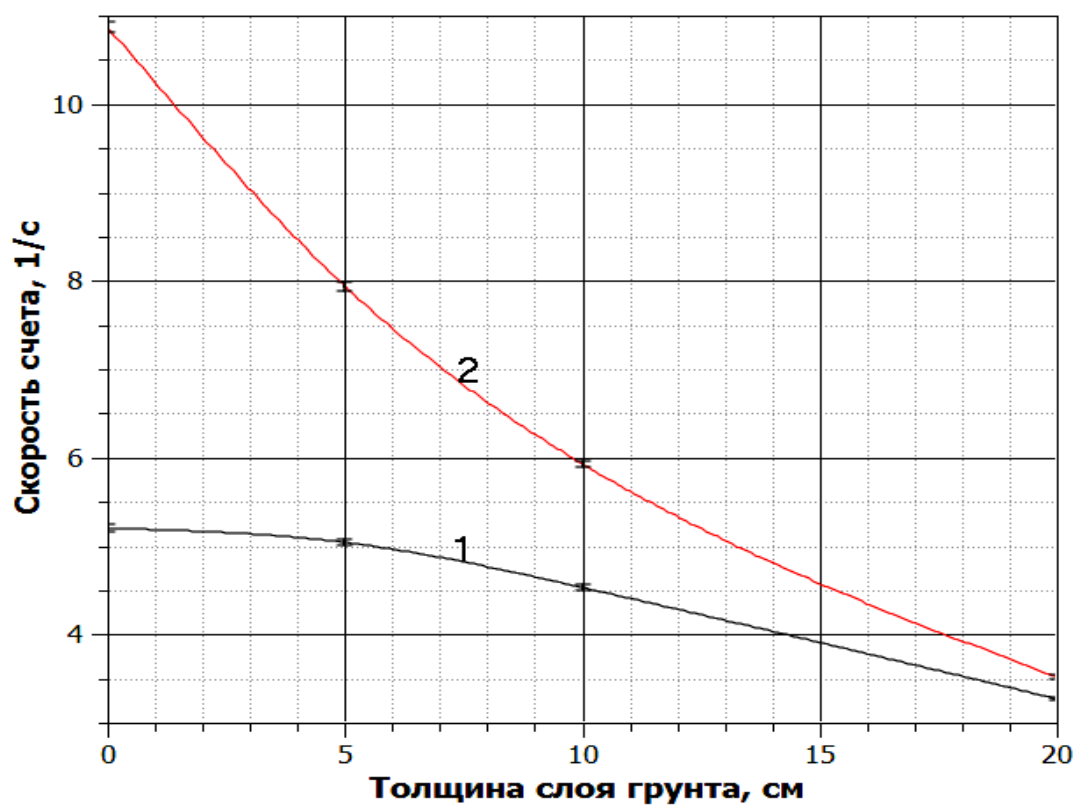


Рисунок 50. Зависимость темпов счета площади комптоновской долины (1) и площади пика полного поглощения (2) от толщины грунта.

Были также определены отношения темпов счета площади пиков полного поглощения к площади комптоновской долины $S_{\text{пик}}/S_{\text{долины}}$ в зависимости от толщины слоя грунта. Площадь комптоновской долины вычислялась в интервале энергий 500-600 кэВ, а площадь пика полного поглощения определялась в результате аппроксимации пика распределением Гаусса (рис. 51).

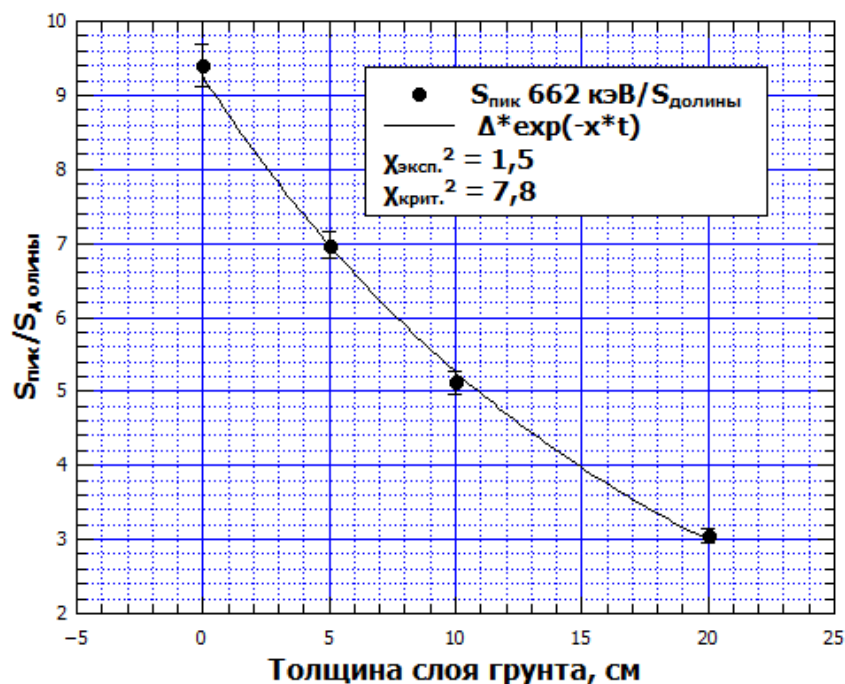


Рисунок 51. Зависимость отношения темпов счета площади пиков полного поглощения к площади комптоновской долины $S_{\text{пик}}/S_{\text{долины}}$ от толщины слоя грунта.

Полученные значения $S_{\text{пик}}/S_{\text{долины}}$ были аппроксимированы функцией (2):

$$S_{\text{пик}}/S_{\text{долины}} = 9,25 \cdot \exp(-0,056 \cdot x), \text{ где } x - \text{толщина поглотителя.}$$

Полученная зависимость позволяет определять глубину залегания точечного источника гамма-излучения в грунте.

Для оценки возможности определения местоположения и размеров области залегания распределенных источников были проведены измерения гамма-спектров от источника ^{137}Cs , смещенного относительно центральной оси детектора, для слоев грунта различной толщины (0, 5, 10 см). Измерения проводились для двух положений детектора – торцевая часть детектора

находилась в одной плоскости с торцевой частью защиты (положение 1) и торцевая часть детектора была углублена относительно торцевой части защиты на 20 см (положение 2).

На рис.52-54 приведены зависимости темпов счета площади пика полного поглощения, площади комптоновской долины, отношения площади пиков полного поглощения к площади комптоновской долины $S_{пик}/S_{долины}$ для различных смещений источника относительно центральной оси детектора в зависимости от толщины грунта. Детектор находился в положении 1.

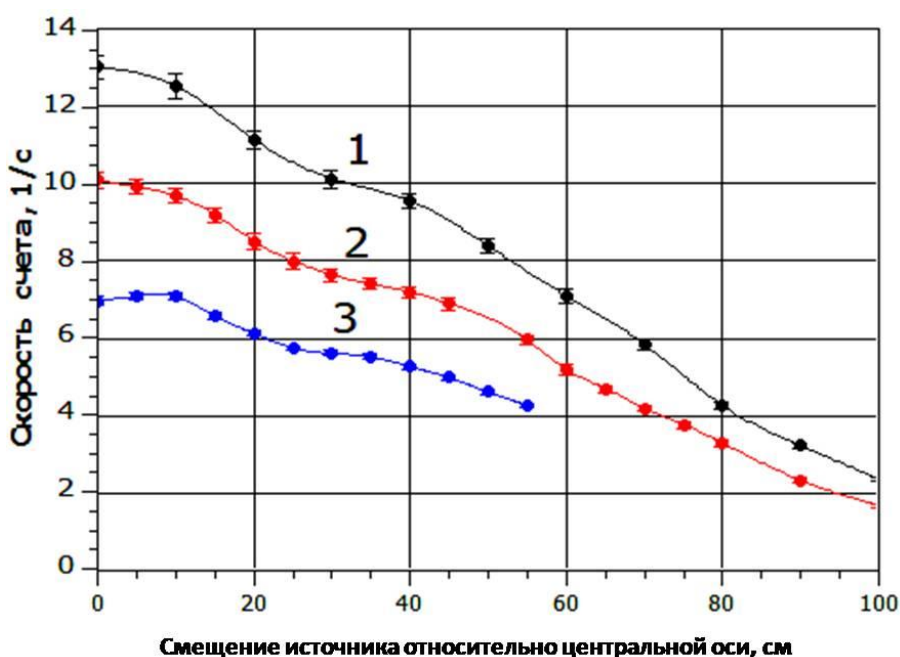


Рисунок 52. Зависимость темпа счета площади пика полного поглощения от смещения источника относительно центральной оси детектора для различной толщины грунта: 1 - без грунта, 2 - грунт толщиной 5 см, 3 - грунт толщиной 10 см. Детектор в положении 1.

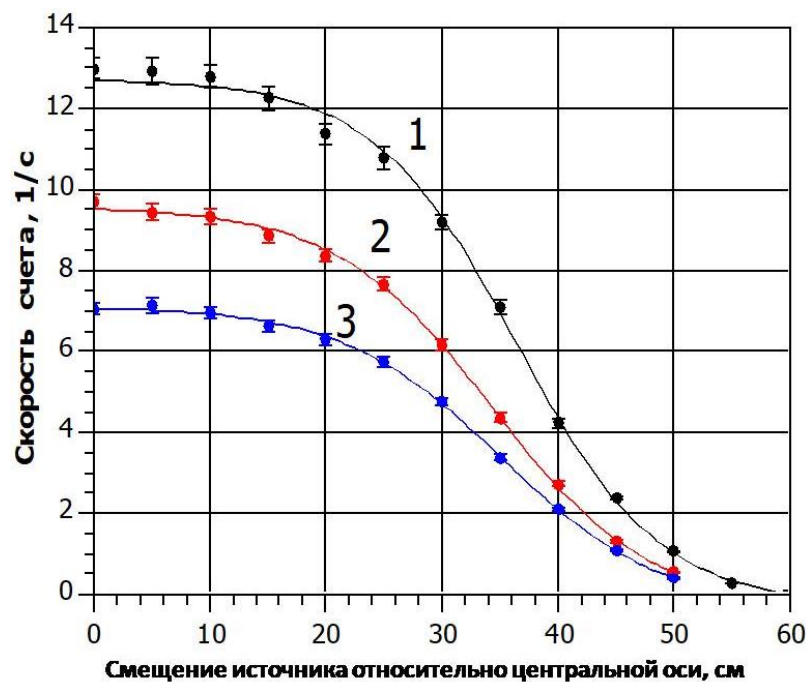


Рисунок 53. Зависимость темпа счета площади комптоновской долины поглощения от смещения источника относительно центральной оси детектора для различной толщины грунта: 1 - без грунта, 2 - грунт толщиной 5 см, 3 - грунт толщиной 10 см. Детектор в положении 1.

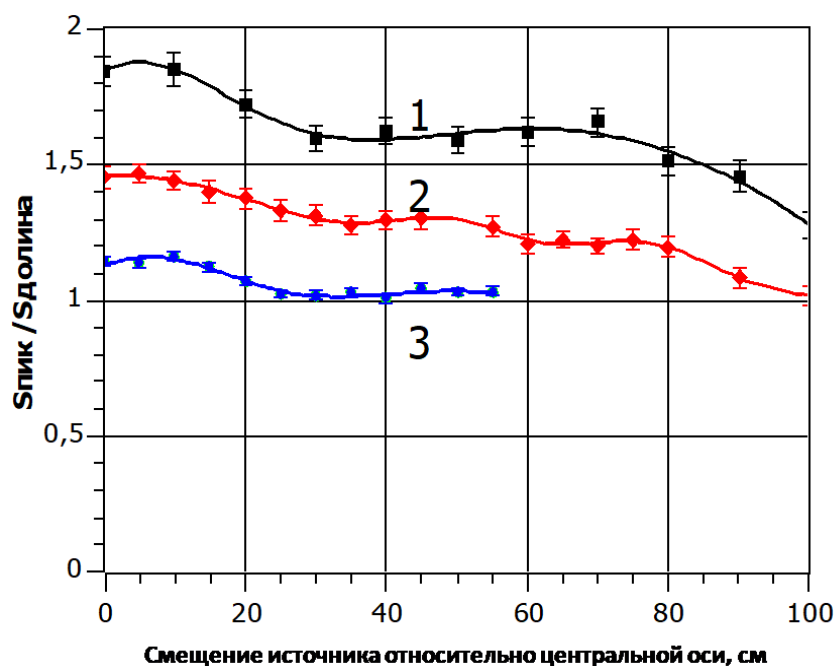


Рисунок 54. Зависимость отношения темпов счета площади пиков полного поглощения к площади комптоновской долины $S_{пик}/S_{долин}$ поглощения от смещения источника относительно центральной оси детектора для различной толщины грунта: 1 - без грунта, 2 - грунт толщиной 5 см, 3 - грунт толщиной 10 см. Детектор в положении 1.

На рис.54-56 приведены зависимости темпов счета площади пика полного поглощения, площади комптоновской долины отношения площади

пиков полного поглощения к площади «комптоновской долины» $S_{\text{пик}}/S_{\text{долины}}$ от смещения источника относительно центральной оси детектора для различной толщины грунта. Детектор находился в положении 2.

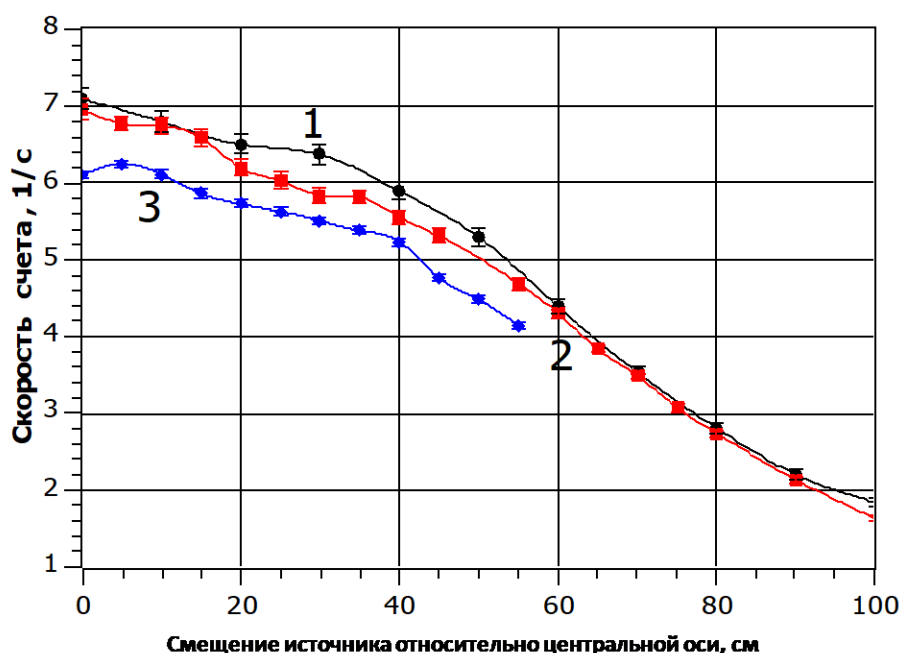


Рисунок 54. Зависимость темпа счета площади пика полного поглощения от смещения источника относительно центральной оси детектора для различной толщины грунта: 1 - без грунта, 2 - грунт толщиной 5 см, 3 - грунт толщиной 10 см. Детектор в положении 2.

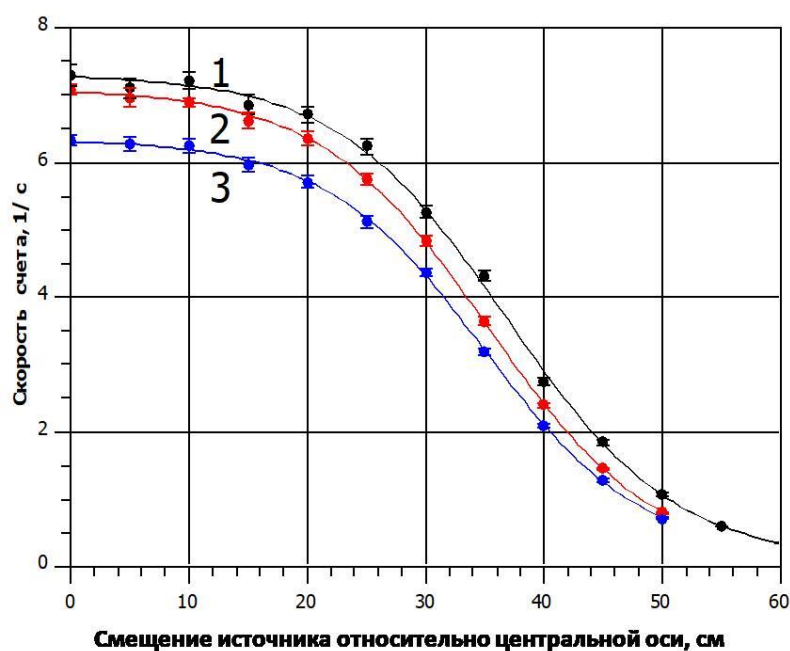


Рисунок 55. Зависимость темпа счета площади комптоновской долины поглощения от смещения источника относительно центральной оси детектора для различной толщины грунта: 1 - без грунта, 2 - грунт толщиной 5 см, 3 - грунт толщиной 10 см. Детектор в положении 2.

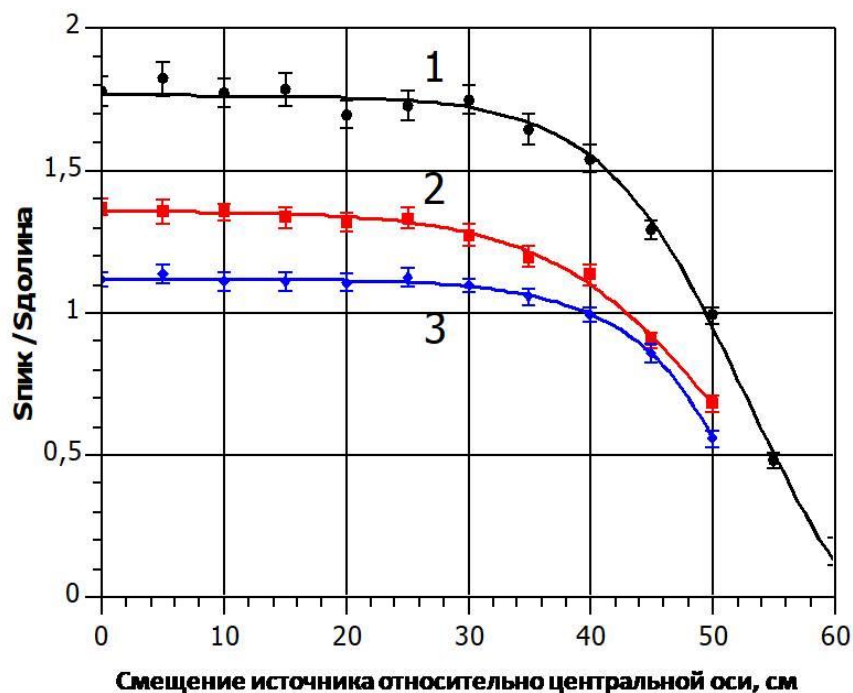


Рисунок 56. Зависимость отношения темпов счета площади пиков полного поглощения к площади комptonовской долины $S_{\text{пик}}/S_{\text{долин}}$ поглощения от смещения источника относительно центральной оси детектора для различной толщины грунта: 1 - без грунта, 2 - грунт толщиной 5 см, 3 - грунт толщиной 10 см. Детектор в положении 2.

При размещении детектора в положении 1, величина отношения $S_{\text{пик}}/S_{\text{долины}}$ слабо зависит от смещения источника относительно центральной оси детектора, что позволяет использовать ее для оценки местоположения и размеров области залегания распределенных источников гамма-излучения размером до 1 м.

При размещении детектора в положении 2, величина отношения $S_{\text{пик}}/S_{\text{долины}}$ слабо зависит от смещения источника относительно центральной оси детектора только на расстояние до 40 см, соответствующее полю зрения детектора в положении 2, что позволяет использовать ее для оценки местоположения и размеров области залегания распределенных источников гамма-излучения размером до 40 см.

Эксперименты показали, что фотопик гамма-источника ^{137}Cs не меняет своё положение. Однако изменяется количество событий в пике полного поглощения в зависимости от толщины грунта (почвы), который был помещен между КГД и ^{137}Cs . Поэтому можно сделать вывод, что

использовать площадь пика для определения местоположения и размеров области залегания источника возможно до тех пор, пока количество событий в пике не уменьшится до уровня фона.

Заключение к Главе 3

По результатам проведенных экспериментов можно сделать заключение, что представленная методика с использованием отношения темпов счета площади пика полного поглощения и площади комптоновской долины позволяет определить активность, радионуклидный состав и глубину залегания радионуклидов. Данная методика позволит применять ее в различных условиях эксплуатации и вывода из эксплуатации атомных объектов, радиоэкологической разведки окружающей среды и устранения последствий атомных техногенных катастроф.

Глава 4 Лабораторные и полевые испытания беспилотного гамма-спектрометрического комплекса

В данной главе представлена информация о беспилотном гамма-спектрометрическом комплексе (БГСК), представляющем собой мобильную дистанционно управляемую роботизированную платформу, оснащенную ксеноновым гамма-спектрометром с высоким энергетическим разрешением, системами управления движением и спутниковой навигации, системой связи и передачи данных, системой технического зрения, прикладным программным обеспечением для сбора, отображения, обработки, сохранения и автоматической передачи данных по радиоканалу на стационарный пост управления мобильным комплексом.

4.1 Программное обеспечение для дистанционного набора гамма-спектров

В ходе выполнения работ по разработке и созданию мобильного комплекса подготовлена и апробирована система дистанционного набора гамма-спектров, временного хранения и передачи гамма-спектров, измеренных с помощью КГС, входящего в состав гамма-спектрометрического комплекса, с использованием разработанного программного обеспечения (ПО) «НАБОР» на базе языка программирования Python. На рис.57 представлен вид рабочего окна ПО-2 «НАБОР».

Для работы программы дистанционного управления КГС использовался микрокомпьютер Raspberry Pi 3 Model B+ 1GBRAM под управлением операционной системы Linux Raspbian (компактный одноплатный микрокомпьютер).

ПО-2, созданное для работы с КГС, решает следующие задачи:

- Считывание данных с КГС;
- Запись спектра в файл;

- Визуализация энергетического спектра для понимания корректности работы КГС.

Для реализации выше указанных функций при создании ПО-2 использовались следующие пакеты и модули:

- **PyQt5**—пакет для создания графического интерфейса пользователя;
- **Matplotlib**—библиотека для построения графиков, необходимая для визуализации спектров;
- **FTDID2xx**— библиотека для работы с драйвером FTDI, по средством - которого происходит передача данных между компьютером и детектором;
- **Save to SPS** – функция записи в файлы спектров SPS.

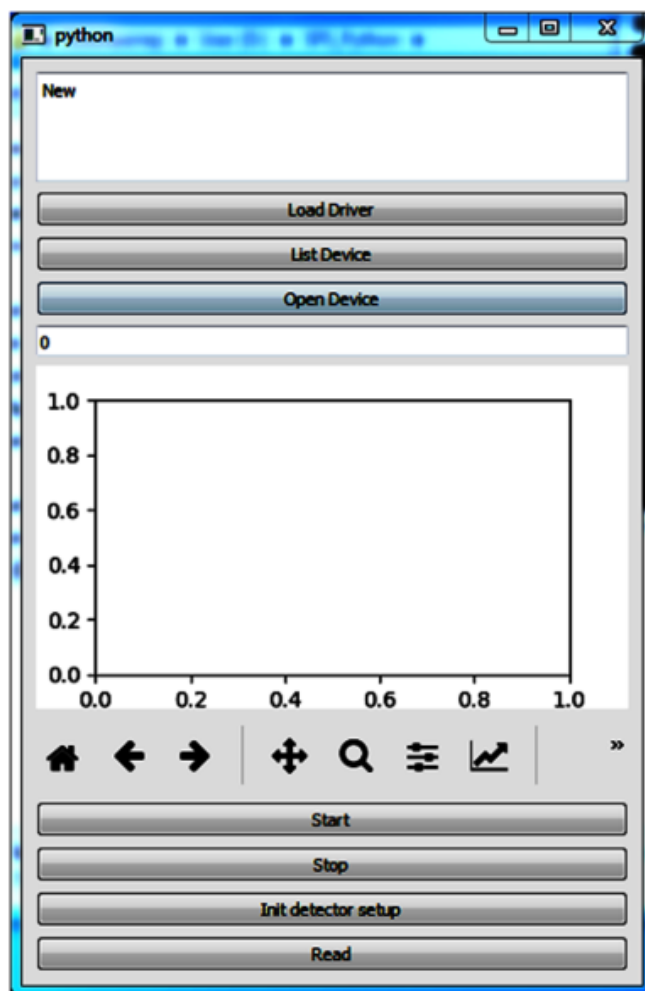


Рисунок 57. Вид рабочего окна ПО-2 «НАБОР».

Стандартная процедура работы с ПО-2 «НАБОР» выглядит следующим образом:

- После запуска программы производится инициализация драйвера FTDID 2xx для работы с электроникой, считывающей данные с КГС;
- Подключение к микроконтроллеру FTDID2xx для обмена данными;
- Программа настраивает порог срабатывания, порог режекции и время интегрирования сигнала с КГС;
- Старт набора спектра по нажатию соответствующей кнопки;
- Каждый две секунды спектр обновляется в окне программы;
- Каждую минуту спектр сохраняется во временный файл на жесткий диск ПК;
- Набор спектра можно остановить, нажав на кнопку «Stop». При этом на жесткий диск сохраняется спектр, набранный за всё время измерения.

С помощью КГС и одноплатного компьютера Raspberry Pi B+ были проведены измерения гамма-спектров от гамма-источников ОСГИ ^{133}Ba , ^{60}Co и ^{22}Na . При этом энергетический спектр каждую минуту сохранялся во временном файле SPS.

На платформе Raspberry Pi был запущен сервер программы Team Viewer для удаленного доступа. Это позволило контролировать набор спектра и копировать экспериментальные данные на удаленный ПК. На рис.58 показан интерфейс ПО-2.

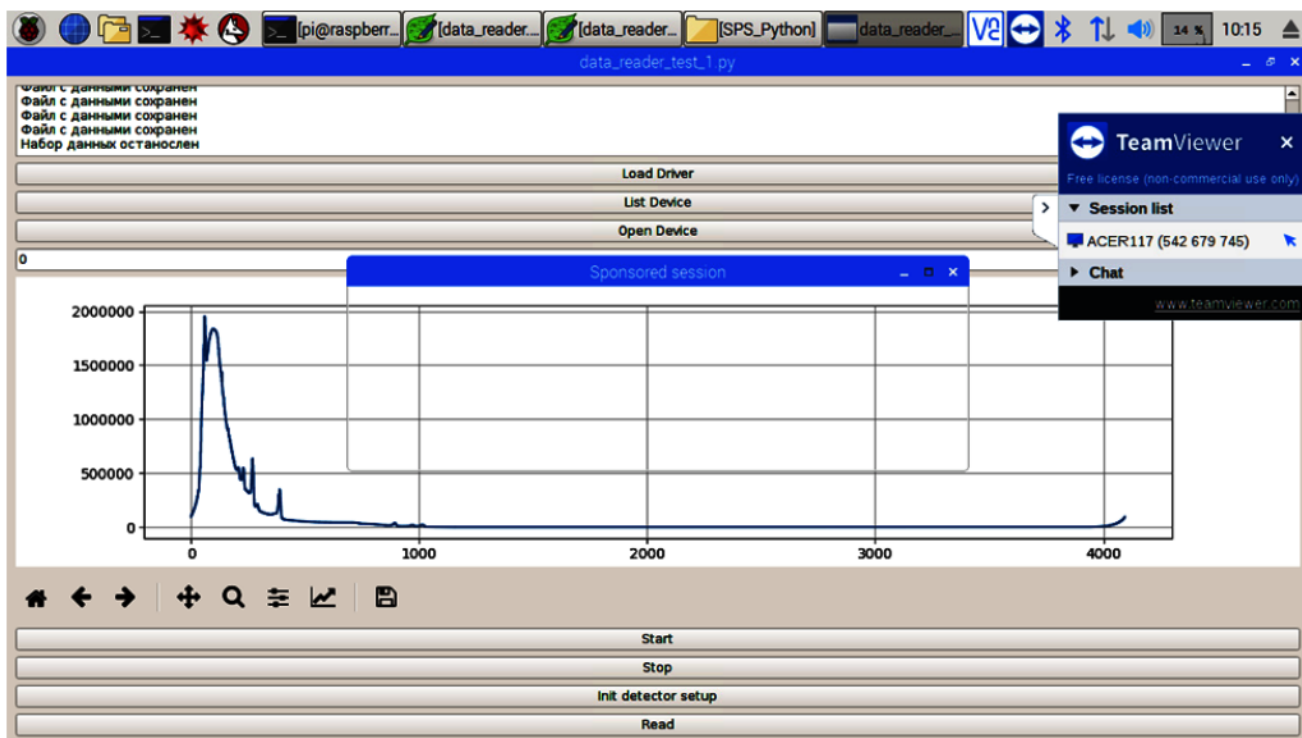


Рисунок 58. Гамма-спектр, измеренный с помощью ПО-2 «НАБОР».

ПО-2 «НАБОР» запущено на платформе Raspberry Pi, подключенной КГС через TeamViewer.

После набора спектра с помощью ПО-2 можно проводить детальное изучение гистограммы, соответствующей энергетическому спектру.

Для рассмотрения отдельных гамма-линий в измеренном энергетическом гамма-спектре можно осуществлять изменение масштаба изображения.

С помощью ПО-2 «НАБОР» были измерены гамма-спектры от стандартных гамма-источников ^{133}Ba , ^{60}Co и ^{22}Na (рис.59-60). Гамма-источник ^{60}Co излучает гамма-кванты энергиями 1332,5 кэВ, 1174 кэВ, ^{22}Na - 1280 кэВ, 511 кэВ и ^{133}Ba - 383 кэВ, 356 кэВ, 302 кэВ, 276 кэВ, 80 кэВ.

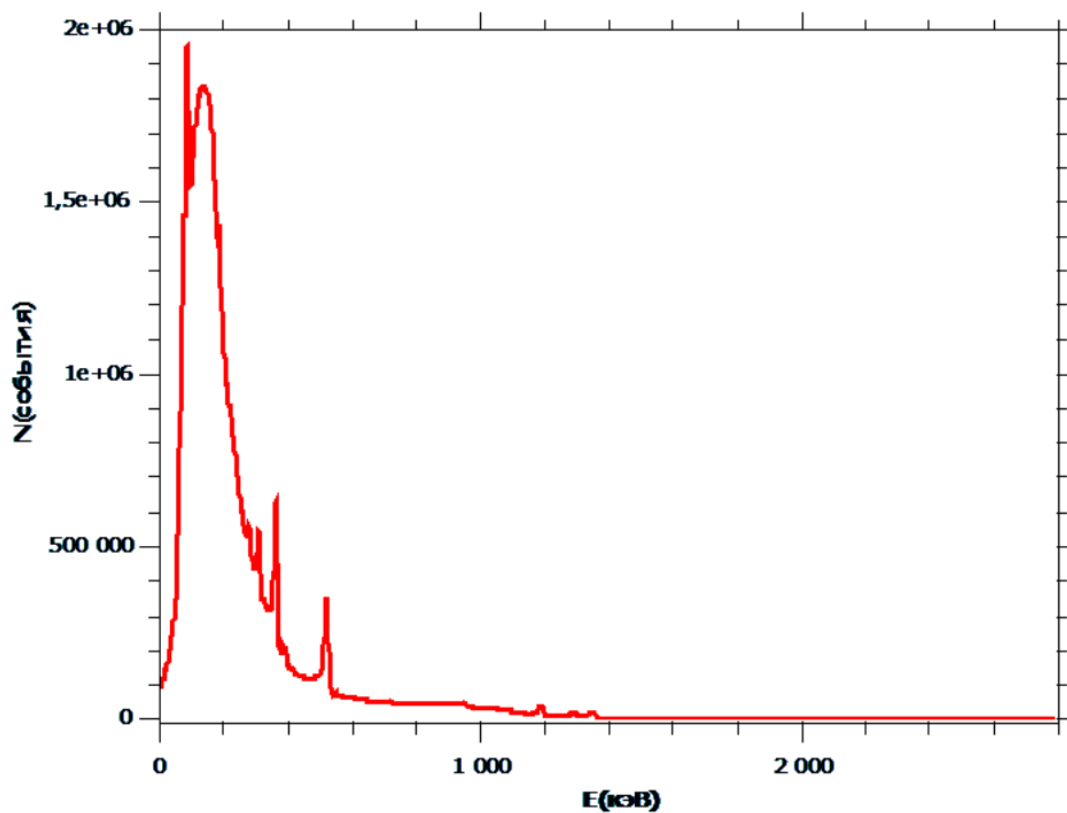


Рисунок 59. Гамма-спектр, полученный с помощью ПО-2 «НАБОР» в линейном масштабе.

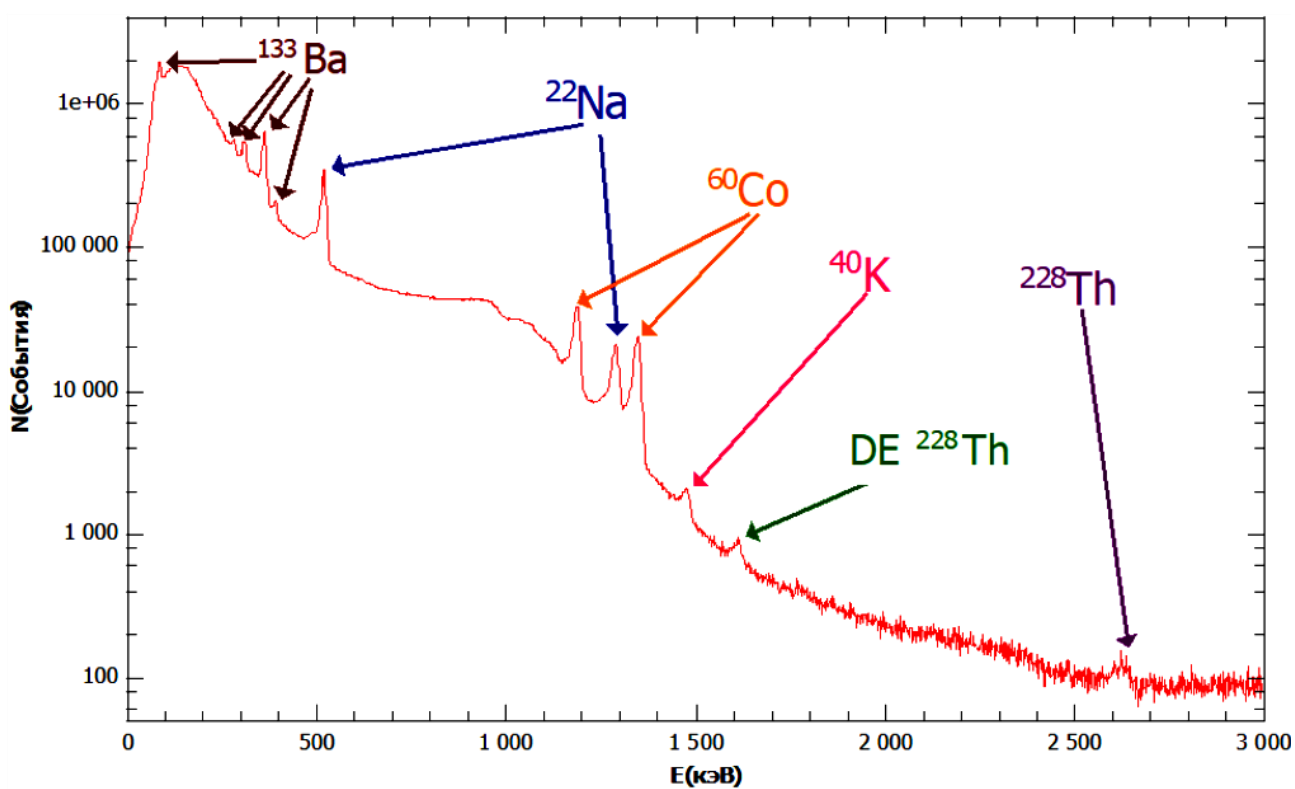


Рисунок 60. Гамма-спектр, полученный с помощью ПО-2«НАБОР» в полулогарифмическом масштабе.

В области высоких энергий (больше одного МэВ) на этих рисунках хорошо видны гамма-линии, характерные для естественных радионуклидов ^{40}K и ^{228}Th , обеспечивающих фоновый поток гамма-квантов.

По результатам проведенных измерений можно сделать вывод о том, что ПО-2 «НАБОР» работает достоверно и стабильно в течение длительного времени непрерывных измерений.

В рамках данной работы анализ вероятных сценариев применения мобильной роботизированной платформы и необходимых для программного обеспечения функций показал, что крайне востребованной опцией в наборе является возможность мониторинга темпа счета гамма-квантов, регистрируемых ксеноновым гамма-спектрометром. Данная функция позволяет выбрать правильное направление движения платформы, чтобы приблизиться к источнику гамма-излучения. Ограничение анализируемой области энергетического спектра в диапазоне соответствующем энергии конкретного радионуклида может помочь найти его положение среди других источников.

Была написана программа Spectrum Control для анализа количества событий в гамма-спектре в заданном диапазоне энергий. На рис.61 показано окно программы, демонстрирующее мониторинг темпа счета фона во всём гамма-спектре от времени измерения.

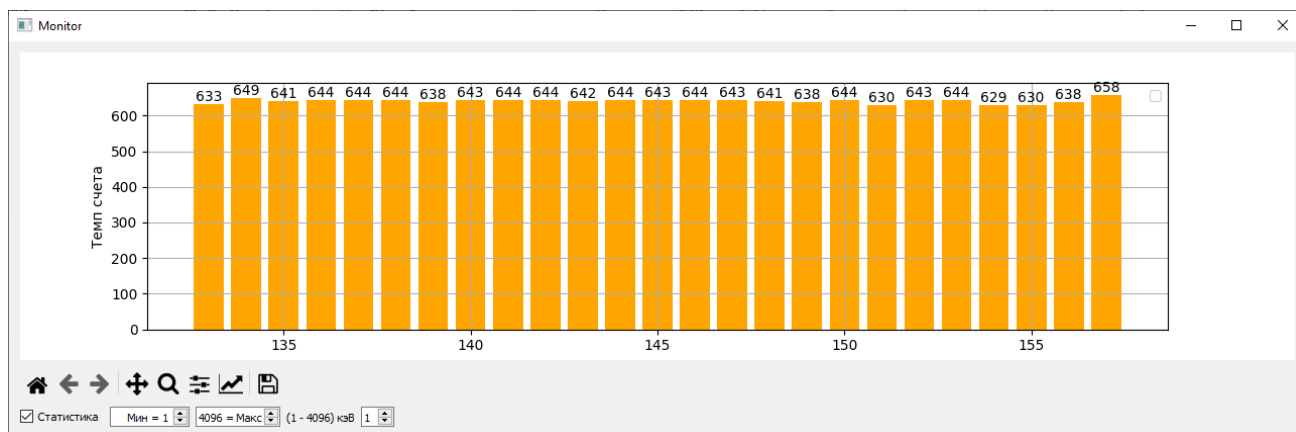


Рисунок 61. Окно программы мониторинга темпа счета фона во всем гамма-спектре от времени измерения.

Оператор может выбрать время обновления статистики, по умолчанию, значение равняется 1 с и выставить границы диапазона энергий для анализа отдельных линий в спектре. На рис.62 показано окно программы, настроенной для исследования гамма-линий с энергий 662 кэВ изотопа ^{137}Cs .

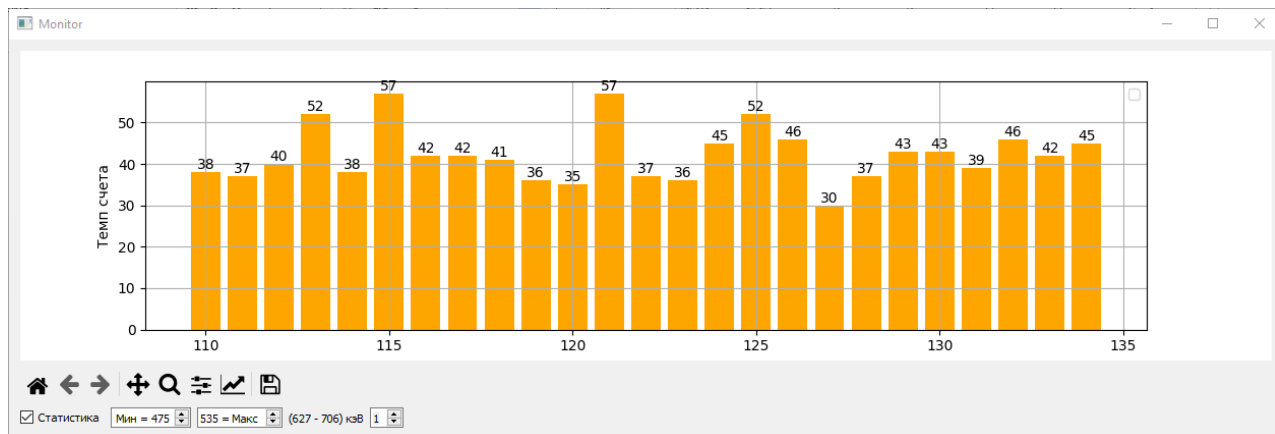


Рисунок 62. Окно программы мониторинга темпа счета линии 662 кэВ.

Новые функции улучшают программное обеспечение и расширяют возможности работы БГСК.

4.2 Беспилотный гамма-спектрометрический комплекс

Беспилотный гамма-спектрометрический комплекс состоит из ксенонового гамма-спектрометра, установленного на роботизированную мобильную платформу Ackerman Wheeltec [34] (рис.63).

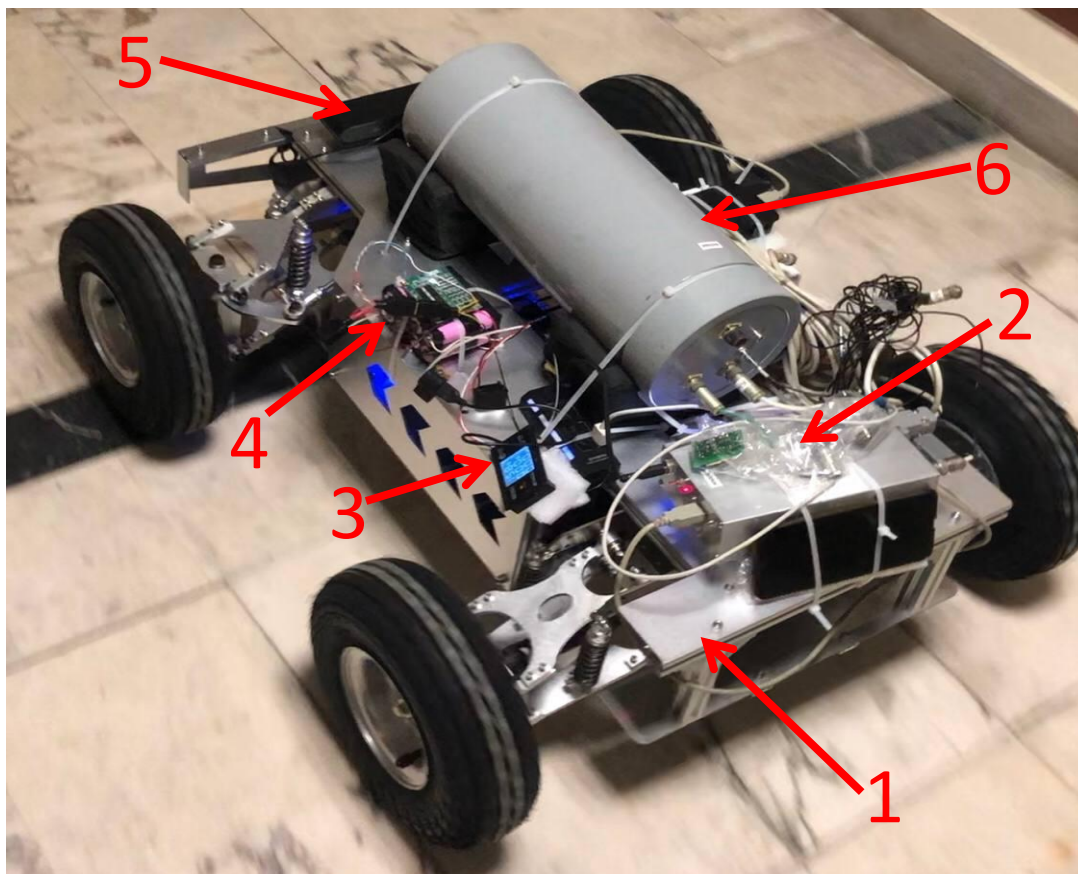


Рисунок 63. беспилотный гамма-спектрометрический комплекс:
 1 – мобильная платформа, 2 – блоки электроники, 3 – одноплатный компьютер, 4 – аккумулятор для одноплатного компьютера, 5 – LIDAR (лазерный дальномер) и датчики мобильной платформы и видеокамера, 6 – КГС.

Характеристики мобильной платформы Ackerman Wheeltec приведены в таблице 7.

Таблица 7. Технические характеристики мобильной платформы Ackerman Wheeltec.

Характеристика	Величина
Придаточное число двигателя	1:18
Максимальная скорость	2,33 м/с
Грузоподъёмность	22 кг
Радиус поворота	1,29 м
Колёса	254 мм
Сервопривод	HW060
Характеристика	Величина

Характеристика	Величина
Мотор	MD60
Энкодер	500-строчный
Лидар	N10
Камера глубины	Есть
Механизм подвески	независимая подвеска с амортизацией
Управление	мобильное приложение, беспроводной контроллер PS2, CAN
Особенности	движение в различных направлениях, дистанционное управление, движение по заданной траектории, предотвращение столкновения
Корпус	алюминиевый сплав
Питание	аккумуляторная батарея 22,2 В, 5000 мАч
Время автономной работы	около 4 часов (без нагрузки), 2,5 часов (с нагрузкой 20%)
Габариты	766 x 671 x 319 мм
Вес	35,16 кг
Корпус	алюминиевый сплав

Управление БГСК и проведение измерений осуществляется с использованием системы дистанционной связи на основе микрокомпьютера на базе одноплатной системы Raspberry Pi 4 B+, работающего под управлением операционной системы (ОС) Raspbian OS (особая модификация дистрибутива Debian Linux). Для данной ОС написано программное обеспечение (ПО) «Spectrum Control» на языке Python для управления набором гамма-спектров КГС. ПО позволяет контролировать набор гамма-спектров, считывать спектрометрические данные из блока цифровой электроники (БЦЭ) КГС, строить и отображать на экране компьютера гистограммы, сохранять данные в памяти микрокомпьютера. Для

осуществления контроля радиационной обстановки оператор-пользователь может установить пороговое значение темпа счета гамма-квантов, которое будет использовать для оповещения о превышении уровня радиации. Испытания роботизированной платформы проходили в Радиационной лаборатории НИЯУ МИФИ (рис.64а). На рис.64б показана блок-схема ПО для удаленного управления БГСК.

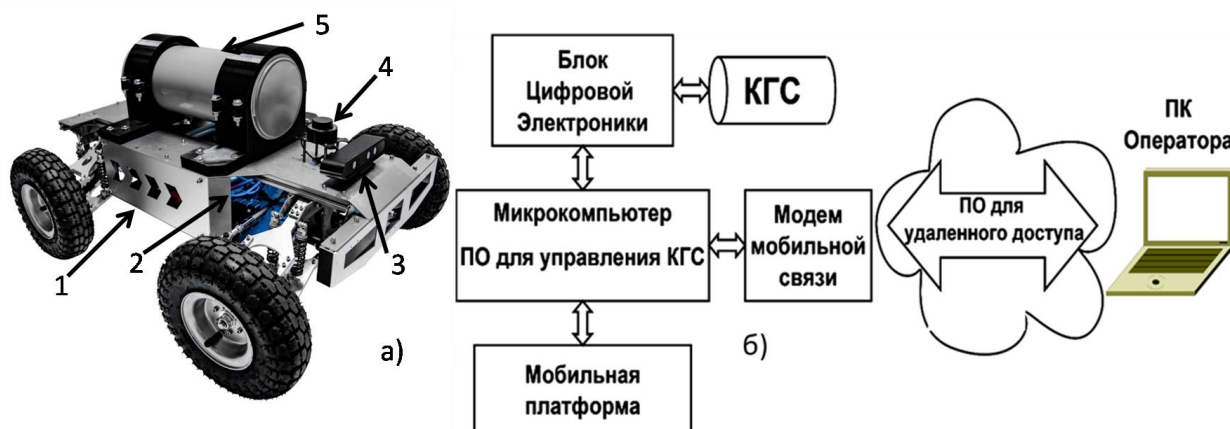


Рисунок 64. Беспилотный гамма-спектрометрический комплекс (а): 1 – мобильная платформа, 2 – блоки электроники, 3 – видеочкамера, 4 – LIDAR (лазерный дальномер), 5 – КГС; (б): блок-схема организации удаленной связи и управления БГСК.

Для организации удаленного подключения к БГСК используется стороннее программное обеспечение с открытым кодом RustDesk. Данное ПО позволяет в режиме сервер-клиент установить связь с удаленным рабочим столом Raspbian OS, дистанционно проводить измерения и управлять БГСК. Для поддержания связи необходимым условием является наличие мобильной связи и модема для подключения Raspberry Pi к сети интернет.

На рисунке 65 продемонстрирован экран рабочего стола оператора при работе с БГСК. В правом нижнем углу окно мониторинга темпа счета гамма-квантов, справа сверху энергетический спектр, измеряемый КГС. Слева окно программы управления мобильной платформой Ackerman Wheeltec с картой местности, построенной при помощи системы LIDAR и изображением с камеры для контроля перемещением комплекса.

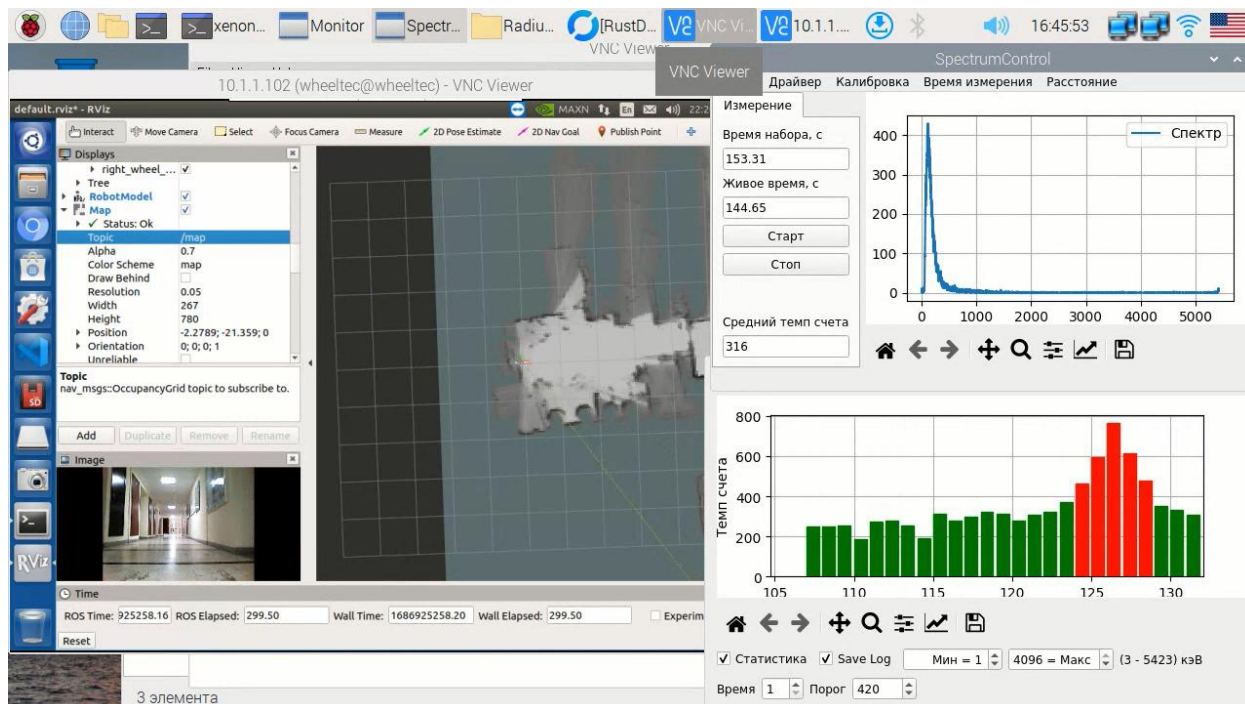


Рисунок 65. Изображения удаленного рабочего стола БГСК.

С целью подготовки ксенонового гамма-спектрометра в составе комплекса были проведены следующие работы:

- апробация БГСК для задач поиска и локализации радиоактивных источников;
- проверка систем дистанционной связи для управления БГСК и набора гамма-спектров при помощи КГС;
- тестирование работы БГСК в различных внешних условиях: внутри помещений и на улице.

4.3 Лабораторные испытания БГСК

Для внедрения и дальнейшего применения КГС сфере экстремальной робототехники в качестве детектирующей установки БГСК, были проведены эксперименты для решения следующих задач:

- построение двумерной карты помещения для проведения лабораторных измерений;
- определение положения источников гамма-излучения;
- проверка влияния вибро-акустических воздействий на КГС.

Испытания БГСК проходили в лаборатории НИЯУ МИФИ. При помощи специализированных алгоритмов для локализации и

картографирования платформы на основе данных, полученных с LIDAR, была создана упрощенная двумерная карта (рис.66) участка коридора лабораторий НИЯУ МИФИ.

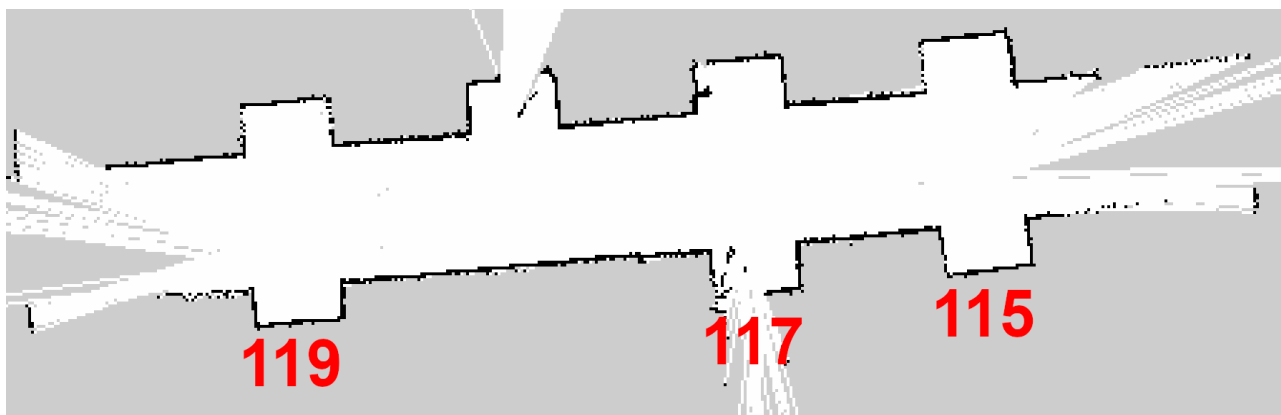


Рисунок 66. Карта коридора лабораторий НИЯУ МИФИ, созданная при помощи БГСК.

На рисунке 66 отмечены красным номера лабораторий института. Черным цветом показаны стены, двери или иные препятствия на пути роботизированной платформы. Белым обозначена исследованная территория, по которой платформа может передвигаться, а серому цвету соответствуют неизвестные и неисследованные области. Из-за особенностей работы системы LIDAR, которая имеет ограниченное дальное действие, на карте есть «особые разрывы» в местах, где она уже не может обнаружить какие-то препятствия вдали от платформы. Также можно отметить, что некоторое угловое смещение объектов объясняется начальным положением роботизированной платформы, а также несовпадением осей комплекса и расположения стен в коридоре.

В ходе измерений использовались одновременно два различных радиоактивных источника на основе изотопов ^{60}Co и ^{137}Cs типа ОСГИ. Расположение источников показано на рис.67.

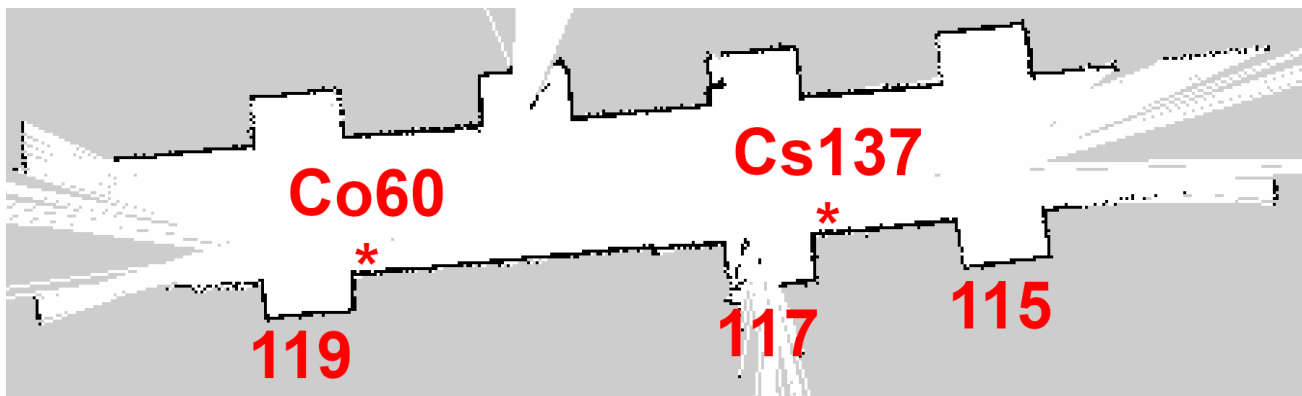


Рисунок 67. Расположение радиоактивных источников в ходе лабораторных изменений.

Платформа перемещалась согласно специально заданной траектории (рис.68), состоящей из трёх прямых треков параллельных друг другу с относительным смещением линий 50 - 100 см.

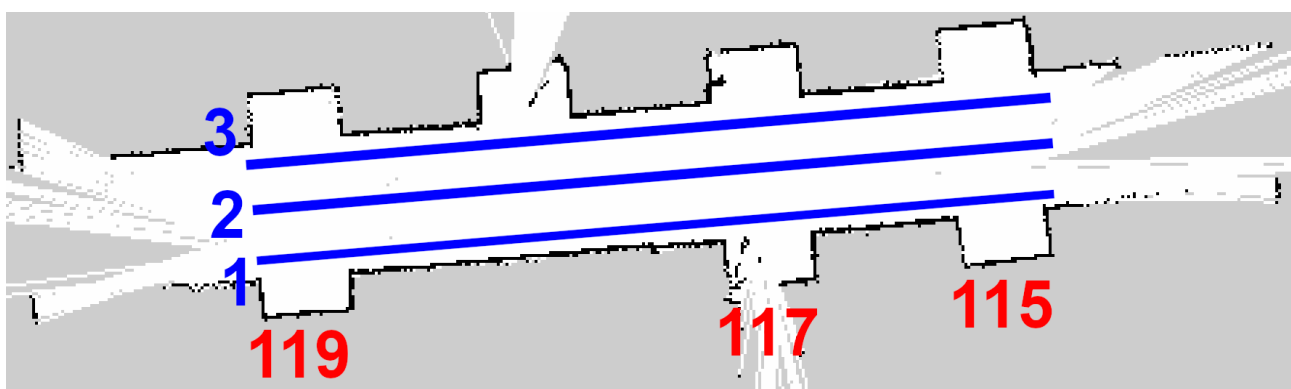


Рисунок 68. Планируемая траектория движения роботизированной платформы в ходе лабораторных изменений.

Данная траектория позволяет свободно перемещать роботизированную платформу в пространстве, не задевая и не врезаясь в окружающие предметы и препятствия. Также исключается проблема симметрии при нахождении источника, т.к. в случае одной средней линии движения радионуклид, находящийся как слева, так и справа от прямой, создаёт одинаковые гамма-спектры, не различимые при прочих равных условиях.

В ходе эксперимента было сделано 30 измерений гамма-спектров длительностью 60 с для каждого набора. Измерения проводились в коридоре и для построения карты активностей роботизированная платформа двигалась вдоль стен таким образом, что на каждом прямом треке было по 10 точек

остановки. На территории в специальных местах располагались источники ОСГИ ^{137}Cs и ^{60}Co . Для управления БГСК использовалось интернет соединение по мобильной сети. Пользователь-оператор подключался к удаленному компьютеру роботизированного комплекса и контролировал перемещение при помощи специального программного обеспечения. На рис.69 показан экран компьютера оператора.

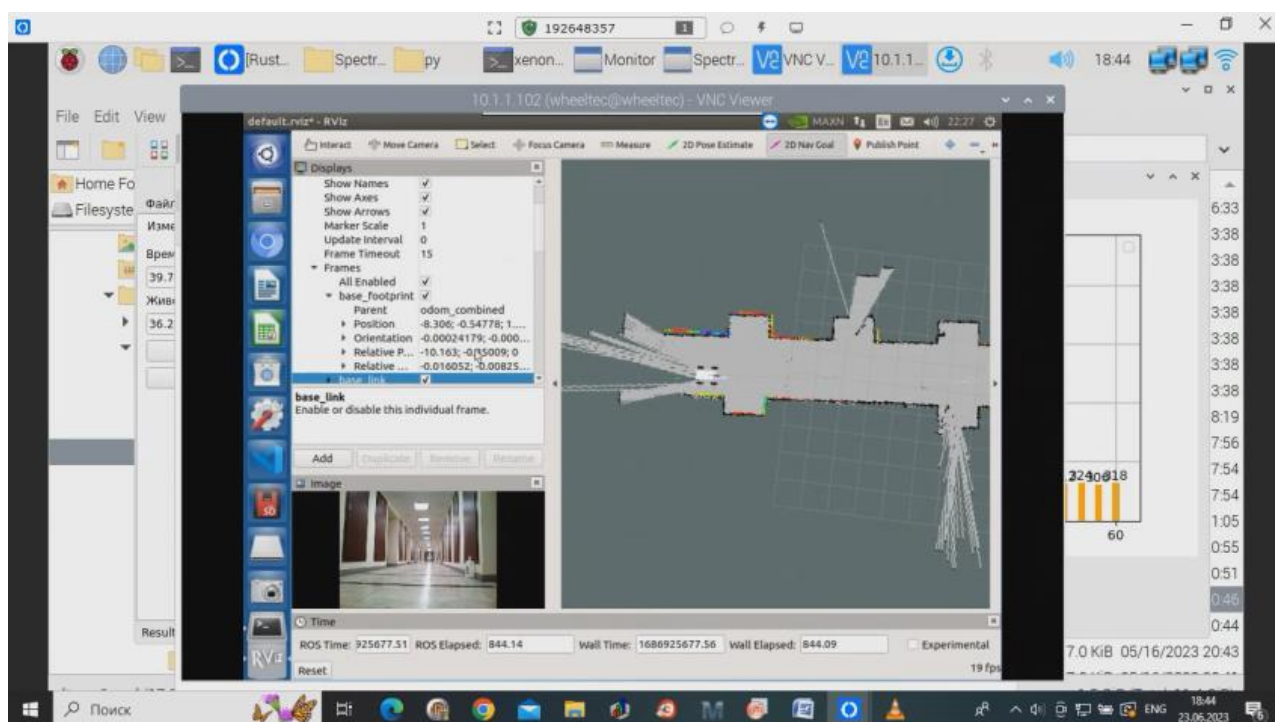


Рисунок 69. Экран оператора с программным обеспечением для управления роботизированной платформой.

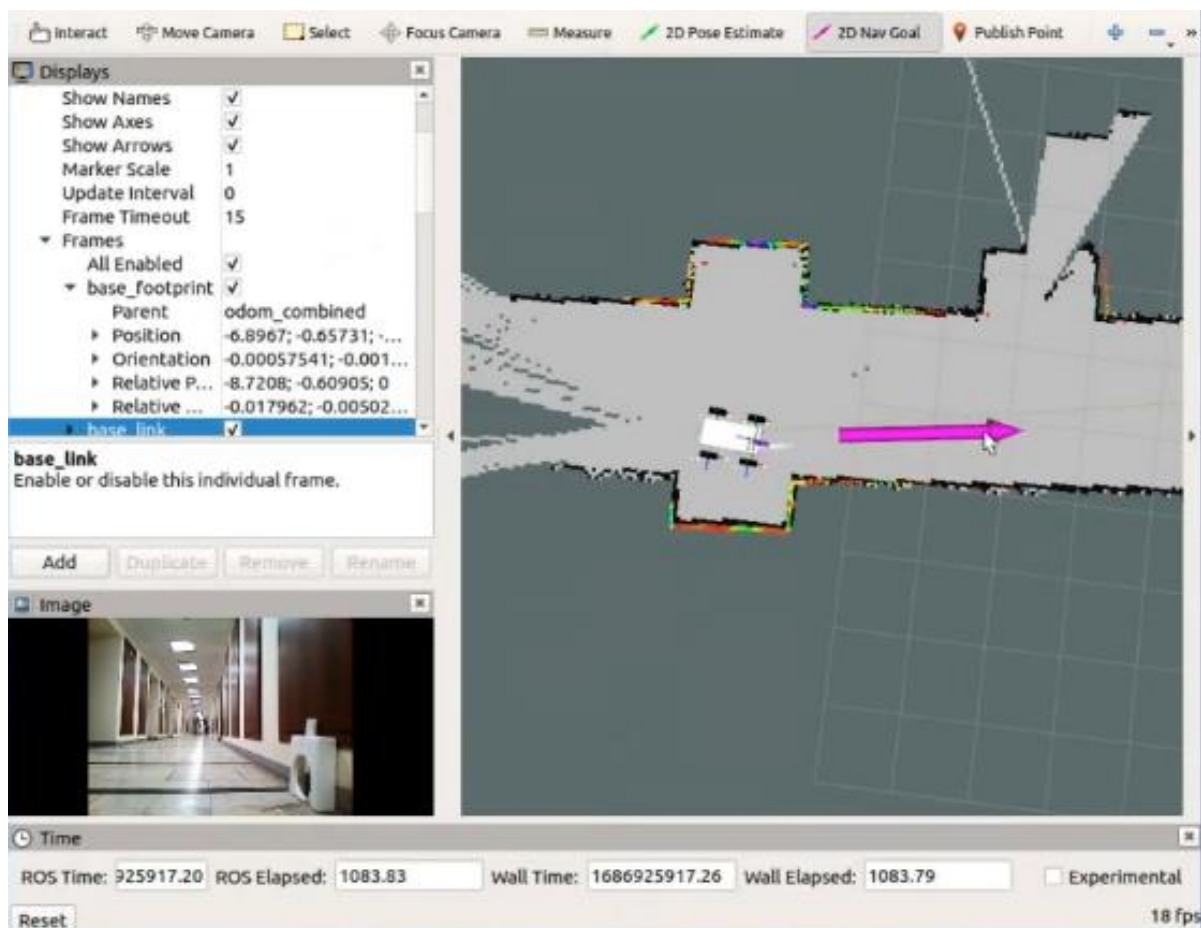


Рисунок 70. Окно программы для управления перемещением платформы.

На рис.70 вектор на экране соответствует позиции и направлению, которое устанавливает оператор для контроля передвижения платформы. Снизу слева можно видеть изображение с камеры, установленной на роботизированной платформе.

На рис.71 показана фотография БГСК рядом с одним из радиоактивных источников в точке измерения №4.



Рисунок 71. Фотография БГСК в момент одного из измерений рядом с источником ^{60}Co .

Набор спектров осуществлялся при помощи специальной программы, предназначенной для управления ксеноновым гамма-спектрометром.

Общая длительность измерений (набор спектров, перемещение платформы и т.д.) составила около 2-х часов. Заряда аккумулятора платформы хватило, чтобы провести измерения для определения положения источников и проверить ксеноновый гамма-спектрометр на вибро-акустические воздействия. Питание роботизированной платформы осуществляется независимо от питания ксенонового гамма-спектрометра. Это позволяет обеспечить более гибкий подход к контролю системы питания различных компонентов, т.к. заряд аккумулятора роботизированной платформы не тратится на питание детектора, то платформы может проработать дольше.

По итогам измерений на основе данных из программы контроля перемещения, роботизированной платформой были получены координаты для каждой точки измерения гамма-спектров. В таблице 8 представлены положения платформы.

Таблица8. Положения платформы в разных точках измерения

Точка	Номер линии	Координата, м		Точка	Номер линии	Координата, м		Точка	Номер линии	Координата, м	
		X	Y			X	Y			X	Y
1	1	-8,306	-0,547	11	2	5,238	1,761	21	3	-8,096	-0,262
2		-6,903	-0,651	12		4,095	1,449	22		-6,442	-0,212
3		-5,211	-0,455	13		2,776	1,244	23		-5,964	-0,133
4		-3,811	-0,215	14		1,502	1,431	24		-4,968	-0,035
5		-2,155	-0,012	15		-0,015	1,23	25		-3,52	0,041
6		-0,848	0,081	16		-1,51	0,933	26		-1,884	0,225
7		0,635	0,051	17		-3,986	0,788	27		-0,292	0,418
8		1,972	0,345	18		-5,028	0,742	28		1,369	0,567
9		3,682	0,493	19		-5,993	0,693	29		2,872	0,642
10		5,396	0,421	20		-7,168	0,469	30		4,328	0,686

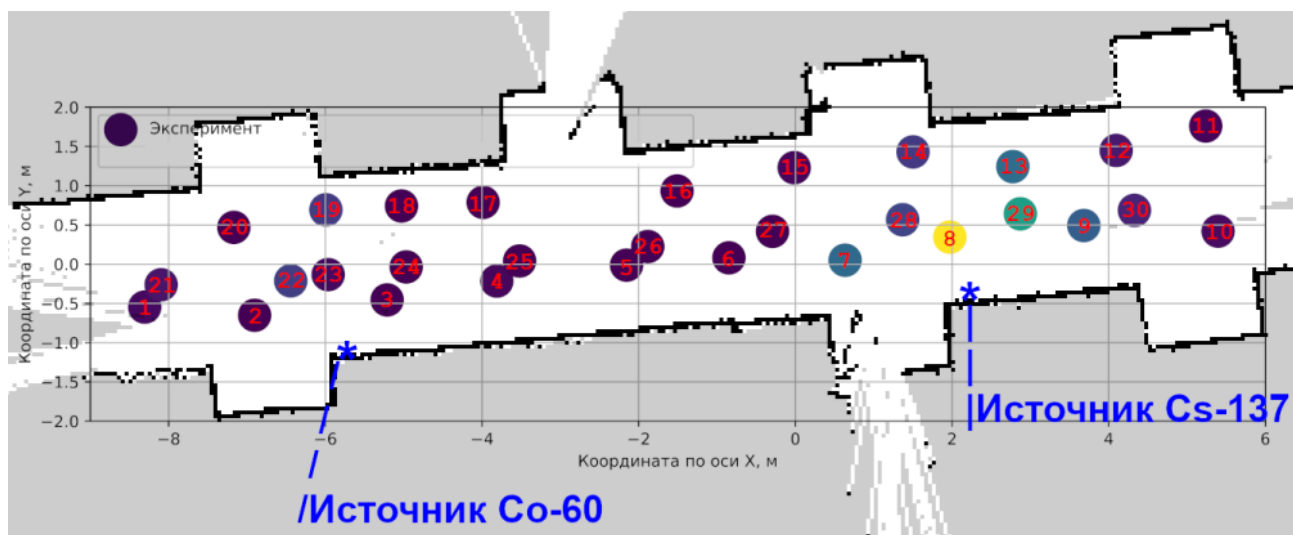


Рисунок 72. Положения точек измерения на карте.

На рис.72 показаны расположения точек, в которых проводились измерения, и их порядковый номер.

Для примера на рис.73 представлены результаты измерений спектров, сделанные БГСК в двух контрольных точках 1 и 2, которые располагались на расстоянии 2,6 м и 1,2 м от источника ^{60}Co [35]. В спектре можно видеть гамма-линии с энергиями 1173,2 кэВ и 1332,5 кэВ, соответствующие изотопу ^{60}Co .

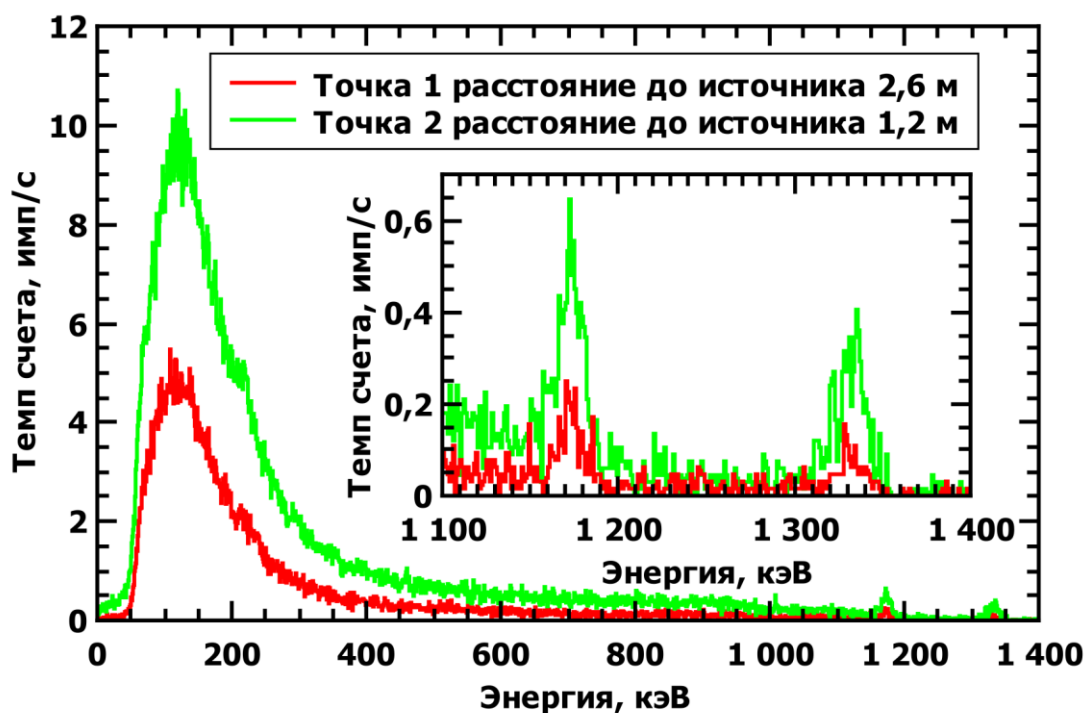


Рисунок 73. Гамма-спектры ^{60}Co , измеренные БГСК в разных точках.

На рисунке 74 представлены результаты измерений спектров, сделанные БГСК в двух контрольных точках 8 и 29 внутри здания, которые располагались на расстоянии 0,8 м и 1,25 м от источника ^{137}Cs . В спектре можно видеть гамма-линию с энергией 662 кэВ, соответствующую изотопу ^{137}Cs .

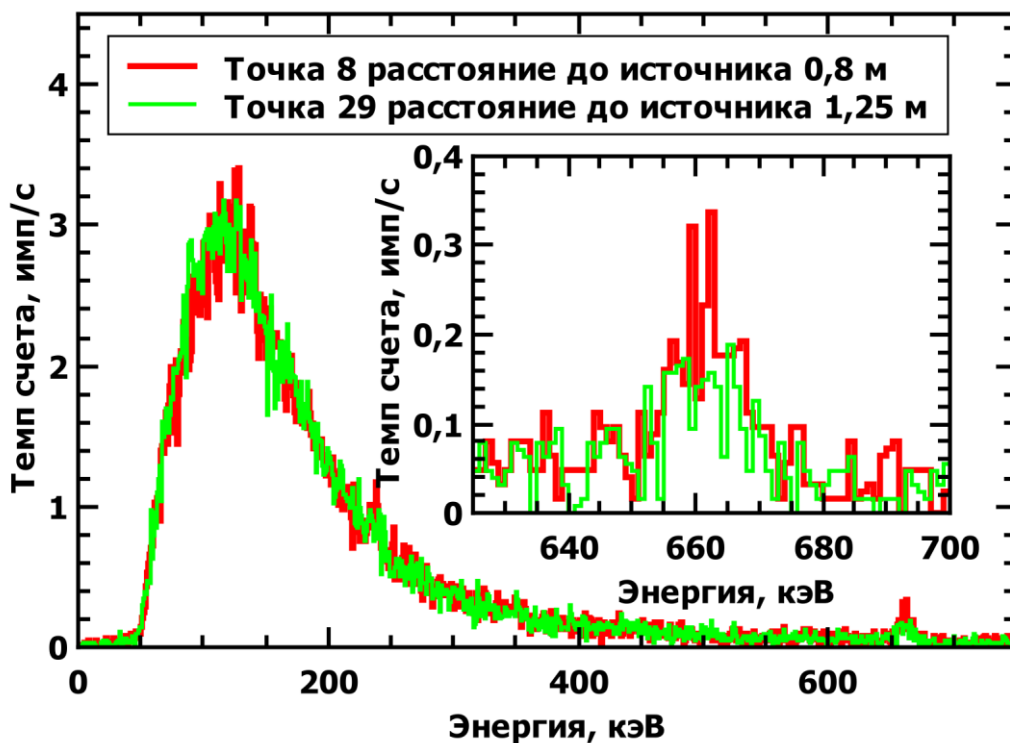


Рисунок 74. Гамма-спектры ^{137}Cs , измеренные БГСК в разных точках.

Для каждой линии 661,7 кэВ, 1173,2 кэВ и 1332,5 кэВ были проведены расчеты значений темпов счета. Спектр в исследуемой области аппроксимировался функцией вида:

$$f(x, x_c, A, \sigma, k, y_0) = y_0 + k \cdot (x - x_c) + \frac{A}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma^2}}, \quad (6)$$

где A – площадь под распределением Гаусса, x_c – энергия гамма-линии, σ – среднеквадратичное отклонение, k – коэффициент наклона прямой, y_0 – смещение. Наиболее информативным является значение параметра A , который соответствует темпу счета в линии полного поглощения. Значение A используется для анализа положения источника.

Обработка пиков аппроксимацией функцией (6) осуществлялась программой Identitication. Однако, аппроксимация пика в программе

Identification не проводится, если амплитуда пика меньше 40 импульсов в максимуме пика. В большинстве экспериментально измеренных спектров пики полного поглощения имеют значение менее 40 импульсов в максимуме, поэтому в программе Identification их обработать не получилось.

Например, для источника ^{137}Cs в самой близкой точке №8 в максимуме пика за 60 секунд измерения набралось только 21 событие (рис.75).



Рисунок 75. Окно программы Identification и спектр ^{137}Cs в точке 8.

Для обработки пришлось аппроксимировать пик с помощью метода наименьших квадратов используя пакет `scipy.optimize` для языка Python (рис.76).

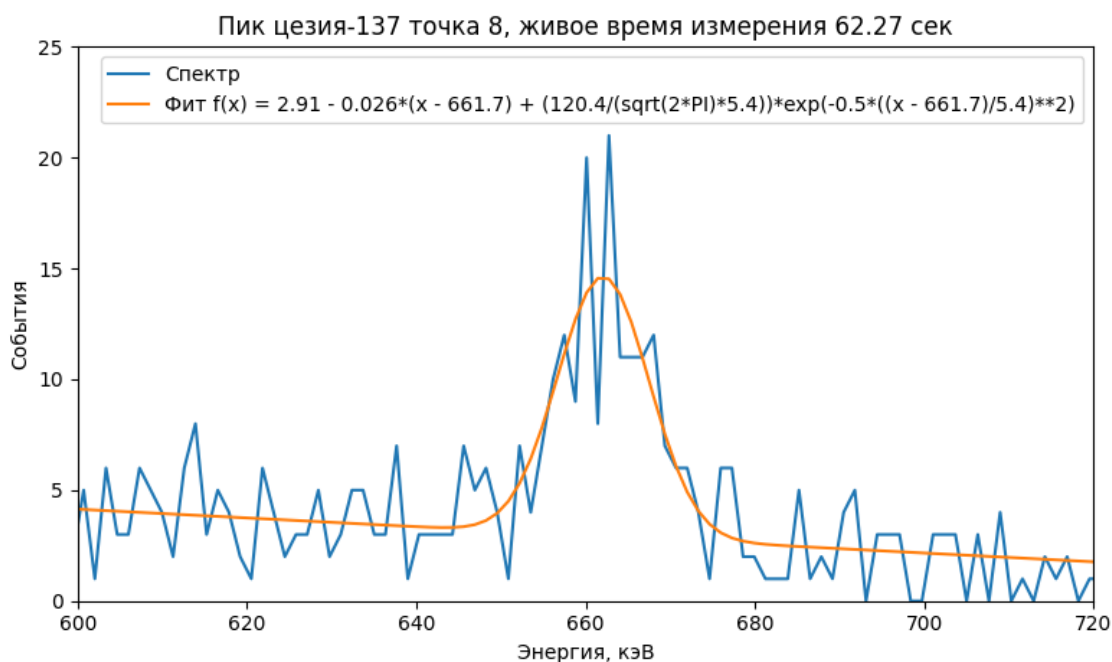


Рисунок 76. Окно программы Python и аппроксимация спектра ^{137}Cs в точке 8.

В некоторых точках (например, 16) в спектре пик слабо различим и в результате аппроксимации значение площади пика близко к нулю (рис. 77).

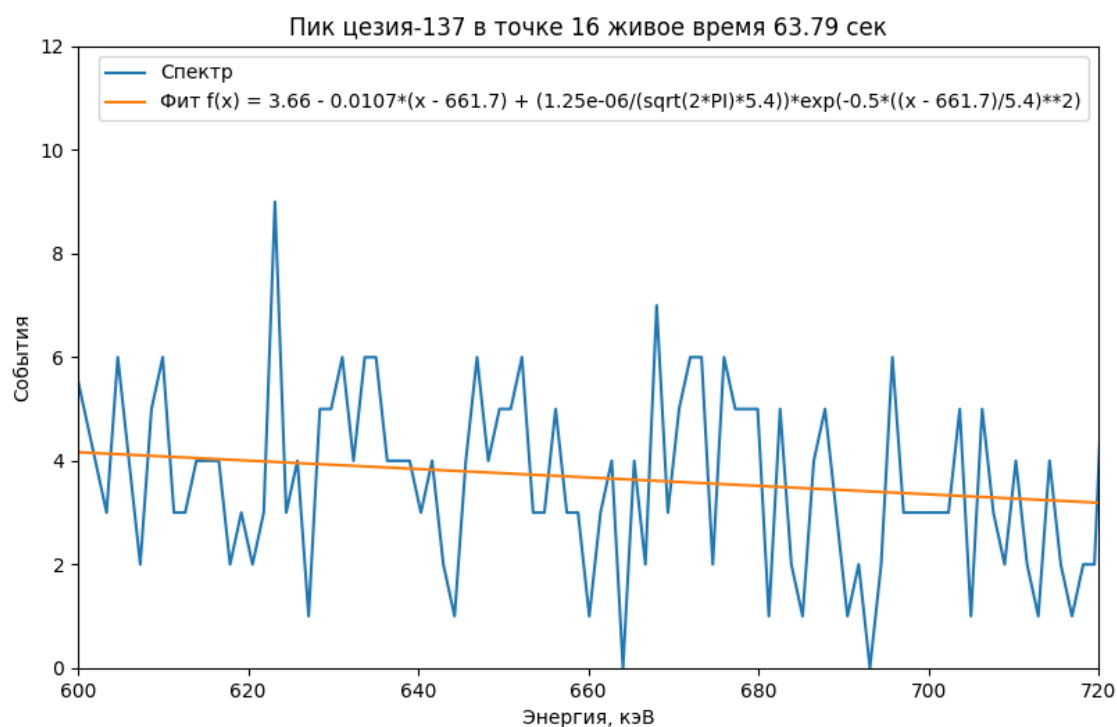


Рисунок 77. Окно программы python и аппроксимация спектра ^{137}Cs в точке 16.

В таблице 9 представлены значения темпов счета, найденные для каждой точки измерения.

Таблица 9. Значения темпов счета для каждой гамма-линий и точки измерения

Точка	Координата		Изотоп ^{137}Cs		Изотоп ^{60}Co			
	Х	Y	Энергия 661,7 кэВ		Энергия 1173,2 кэВ		Энергия 1332,5 кэВ	
			Темп счета, имп/с	Погрешность, имп/с	Темп счета, имп/с	Погрешность, имп/с	Темп счета, имп/с	Погрешность, имп/с
1	-8,306	-0,547	0,067	0,186	1,949	0,151	1,271	0,091
2	-6,903	-0,651	0	0,032	5,636	0,214	5,082	0,209
3	-		0	0,034				
	5,2111	-0,455			10,987	0,274	10,001	0,305
4	-3,811	-0,215	0,046	0,241	1,870	0,138	1,794	0,115
5	-2,155	-0,012	0	0,140	0,303	0,081	0,427	0,082
6	-0,848	0,081	0	0,129	0,141	0,075	0,149	0,062
7	0,635	0,051	0,679	0,112	0,118	0,059	0,056	0,049
8	1,972	0,345	1,982	0,136	0,044	0,066	0,038	0,050
9	3,682	0,493	0,593	0,107	0,129	0,072	0,033	0,052
10	5,396	0,421	0,083	0,102	0,131	0,059	0,004	0,056
11	5,238	1,761	0,034	0,101	0,039	0,065	0	0,029
12	4,095	1,449	0,148	0,111	0	0,052	0	0,060
13	2,776	1,244	0,699	0,121	0,085	0,064	0,079	0,060
14	1,502	1,431	0,343	0,117	0,072	0,070	0	0,058
15	-0,015	1,23	0,040	0,119	0,140	0,067	0,212	0,054
16	-1,51	0,933	0	0,011	0,151	0,086	0	0,056
17	-3,986	0,788	0	0,023	1,650	0,159	1,963	0,123
18	-5,028	0,742	0	0,024	4,172	0,205	3,685	0,157
19	-5,993	0,693	0,356	0,274	3,877	0,183	4,016	0,181
20	-7,168	0,469	0	0,154	3,213	0,135	2,707	0,127
21	-8,096	-0,262	0,119	0,018	1,626	0,120	1,445	0,097

22	-6,442	-0,212	0,368	0,028	4,319	0,184	4,424	0,185
23	-5,964	-0,133	0,062	0,363	8,564	0,268	8,558	0,291
24	-4,968	-0,035	0	0,026	7,305	0,234	6,712	0,225
25	-3,52	0,041	0	0,019	1,715	0,130	1,601	0,116
26	-1,884	0,225	0,011	0,001	0,360	0,096	0,201	0,069
27	-0,292	0,418	0	0,105	0,155	0,073	0,112	0,063
28	1,369	0,567	0,412	0,112	0,121	0,065	0,095	0,063
29	2,872	0,642	1,114	0,124	0,147	0,077	0,009	0,061
30	4,328	0,686	0,204	0,100	0,004	0,068	0,068	0,059

На рис.78 – 80 показаны результаты измерений в виде двухмерного распределения темпов счета для отдельных гамма-линий соответствующих источников.

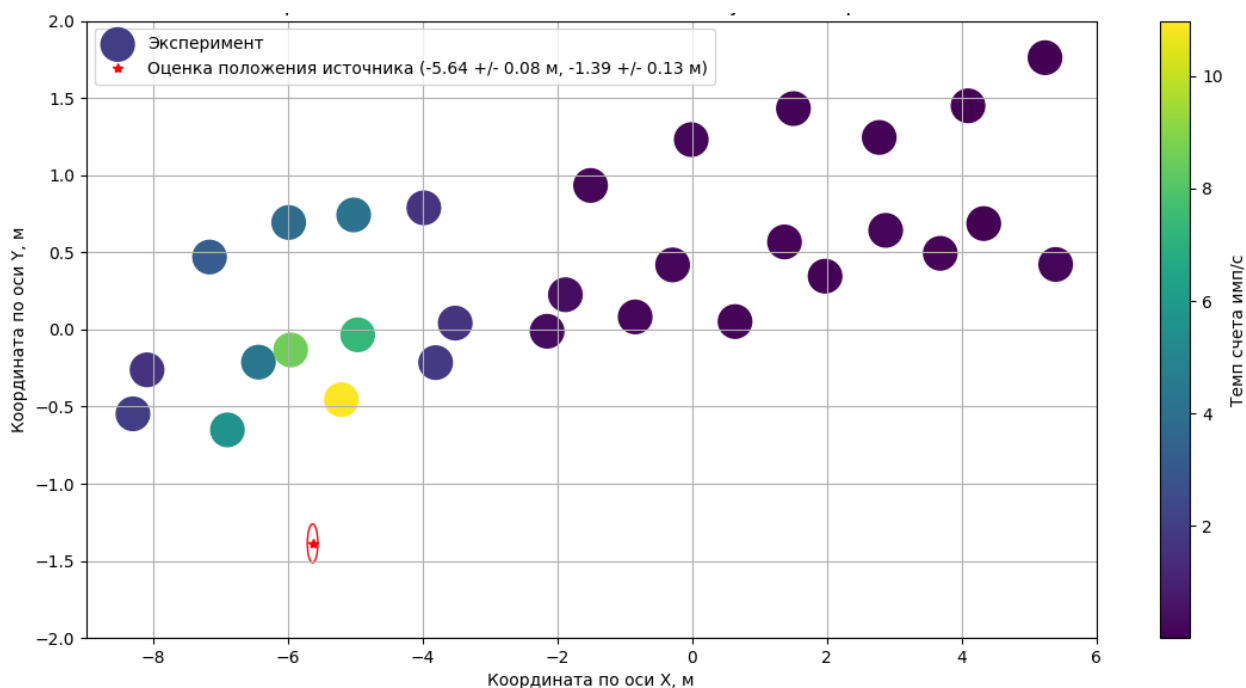


Рисунок 78. Распределение для источника ^{60}Co на основе измерения темпа счета в линии 1174 кэВ.

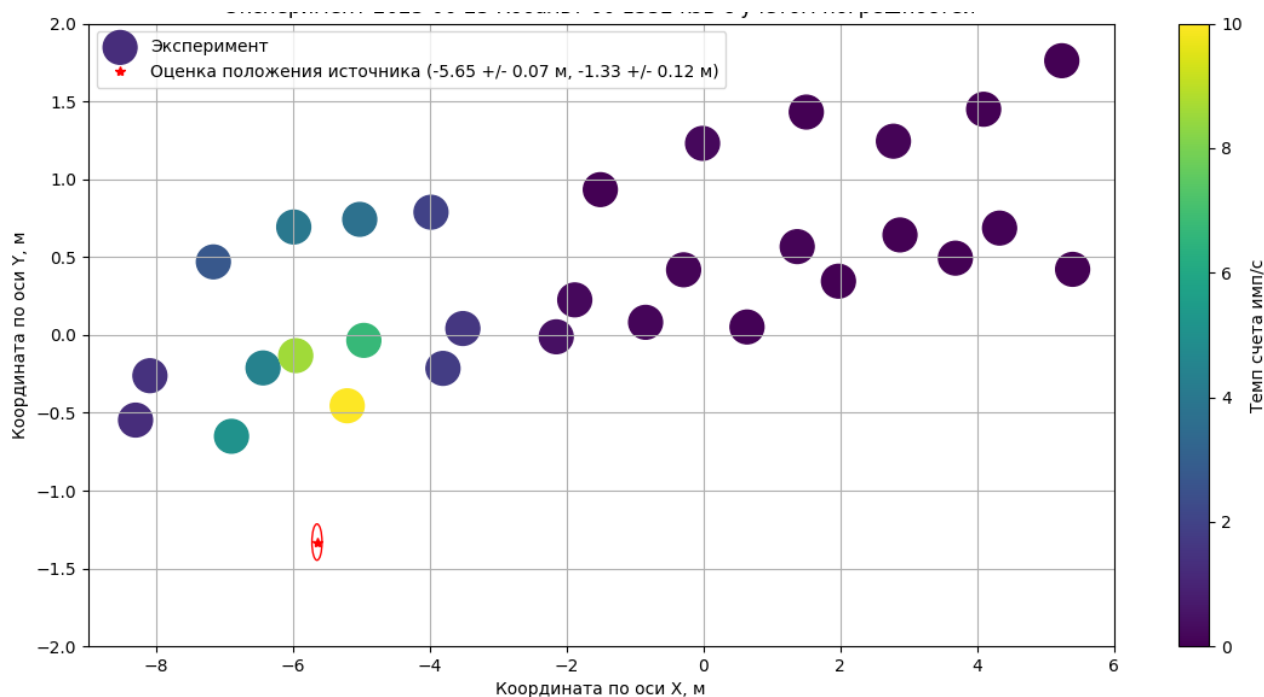


Рисунок 79. Распределение для источника ^{60}Co на основе измерения темпа счета в линии 1332,5 кэВ

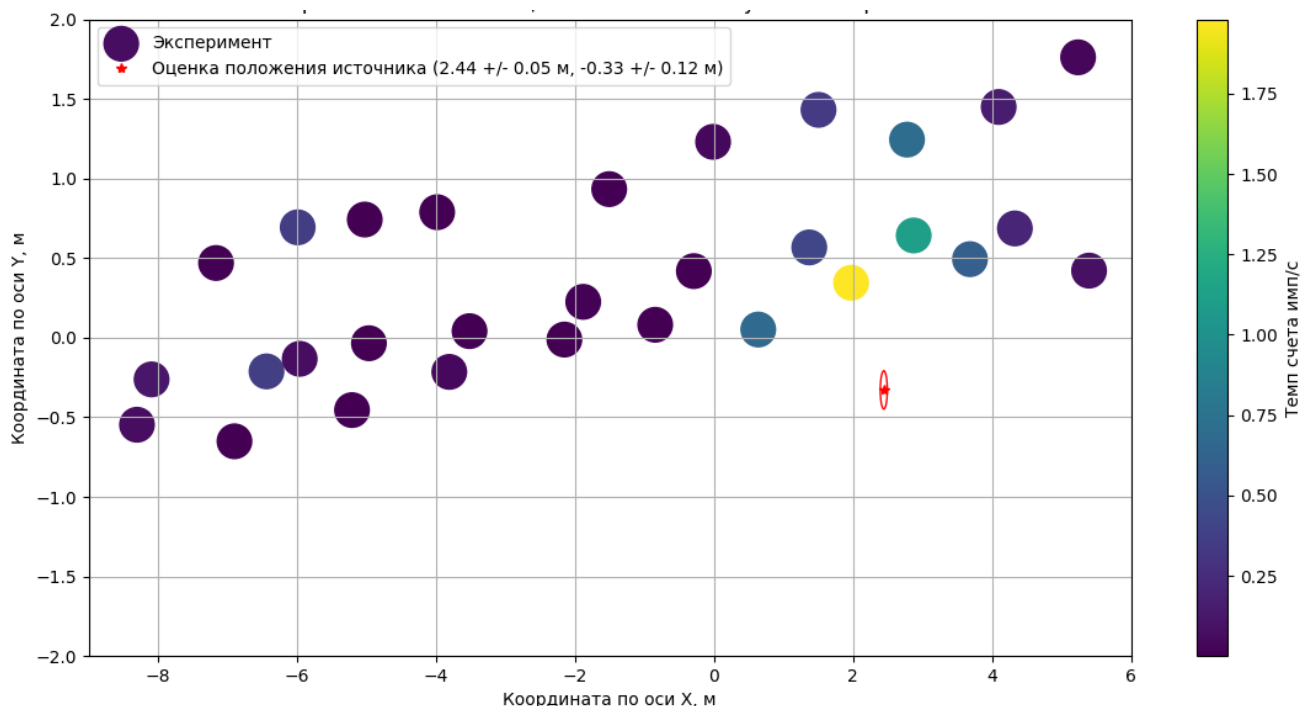


Рисунок 80. Распределение для источника ^{137}Cs на основе измерения темпа счета в линии 662 кэВ.

Можно отметить, что максимальные темпы счета для каждой линии находятся в области расположенной ближе всего к используемым источникам. На графиках красной звездой отмечено положение источника, найденное методом наименьших квадратов в предположении, что темп счета подчиняется функции вида:

$$f(x, y, x_0, y_0, A, B) = B + \frac{A}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (7)$$

где B – фоновое значение темпа счета в области анализируемой линии, A – нормировочный коэффициент, x_0 и y_0 – координаты расположения источника. Эллипс, показанный, на графиках соответствует ошибке координаты, найденной методом наименьших квадратов. На рис.81 – 83 представлены графики распределения темпов счета (см. табл. 10), совмещенные с картой исследуемой территории. Синей звездой отмечено истинное положение источника.

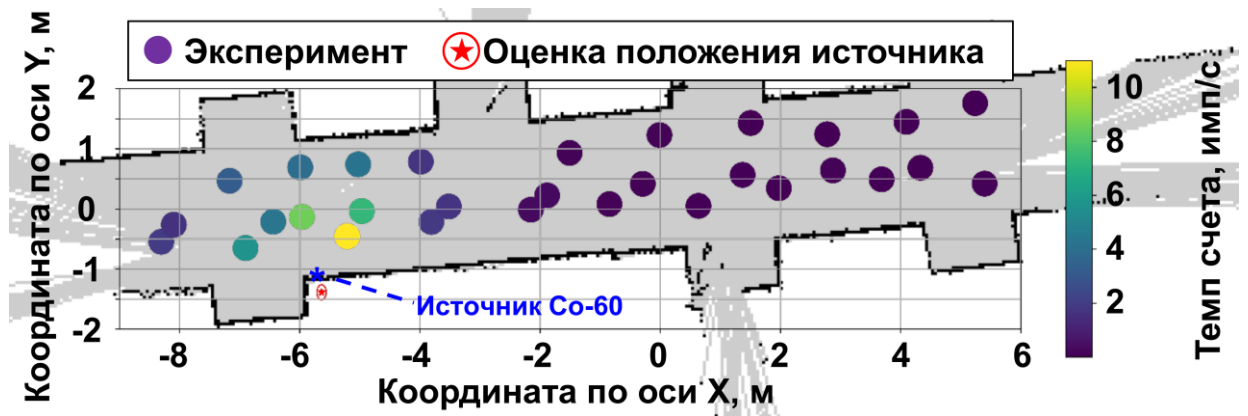


Рисунок 81. Наложение графика темпов счета и найденного положения источника на карту для анализа пика 1173,2 кэВ.

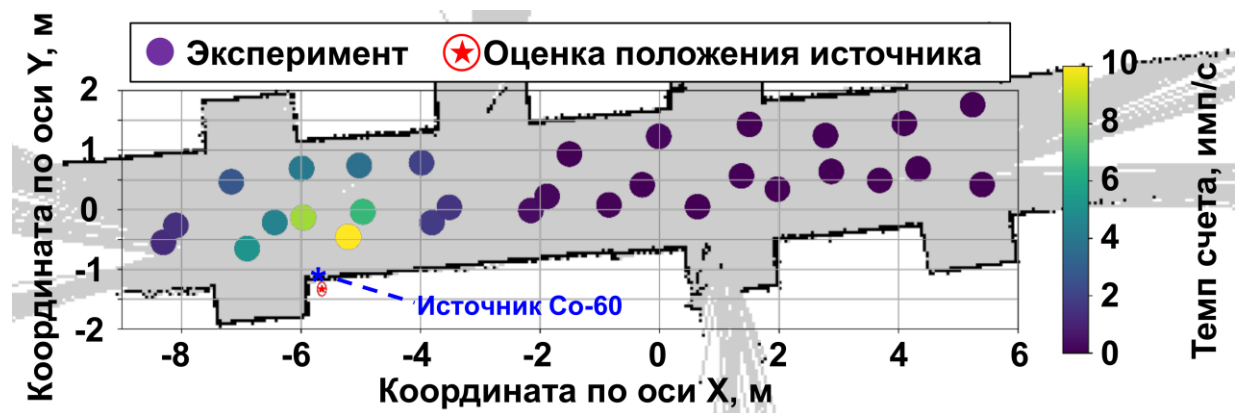


Рисунок 82. Наложение графика темпов счета и найденного положения источника на карту для анализа пика 1332,5 кэВ.

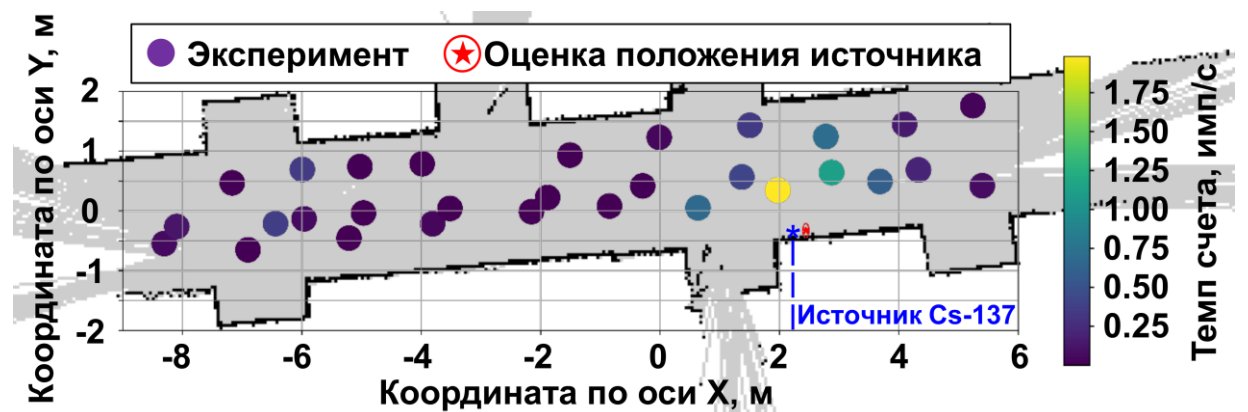


Рисунок 83. Наложение графика темпов счета и найденного положения источника на карту для анализа пика 662кэВ.

Таблица 10. Координаты источников и сравнение с найденным положением

Изотоп	^{137}Cs		^{60}Co			
Энергия, кэВ	662		1173,2		1332,5	
Координата	X	Y	X	Y	X	Y
Истинное положение, м	2,2 $\pm 0,2$ (сист)	-0,4 $\pm 0,2$ (сист)	-5,8 $\pm 0,2$ (сист)	-1,1 $\pm 0,2$ (сист)	-5,8 $\pm 0,2$ (сист)	-1,1 $\pm 0,2$ (сист)
Найденное положение, м	2,44 $\pm 0,2$ (сист) $\pm 0,05$ (стат)	-0,33 $\pm 0,2$ (сист) $\pm 0,12$ (стат)	-5,64 $\pm 0,2$ (сист) $\pm 0,08$ (стат)	-1,39 $\pm 0,2$ (сист) $\pm 0,13$ (стат)	-5,65 $\pm 0,2$ (сист) $\pm 0,07$ (стат)	-1,33 $\pm 0,2$ (сист) $\pm 0,12$ (стат)
Отклонение, м	0,24	0,07	0,16	0,29	0,15	0,23
сист – систематическая ошибка, стат – статистическая погрешность						

Следует отметить, что в эксперименте оба источника располагались рядом со стеной коридора и в результате анализа получены непротиворечивые значения координат, которые позволяют локализовать источник. Присутствующие отклонения могут быть объяснены различными факторами: малым количеством измерений рядом с источником, ошибками определения координат, которые выдает программа управления перемещением платформы или несоответствием масштабов и координат при совмещении карты и распределения активностей.

Для проверки влияния вибро-акустических воздействий, возникающих во время движения БГСК, на гамма-спектры КГС были проведены 3 измерения длительностью 3 минуты каждое в следующих условиях:

- В момент движения роботизированной платформы. Движения сочетались с резкими остановками для имитации поездки в сложных условиях.
- В момент остановки с работающими системами роботизированной платформы
- В момент остановки с выключенными системами роботизированной платформы

На рис.84-85 показаны спектры гамма-источника ^{137}Cs , которые использовались для тестирования.

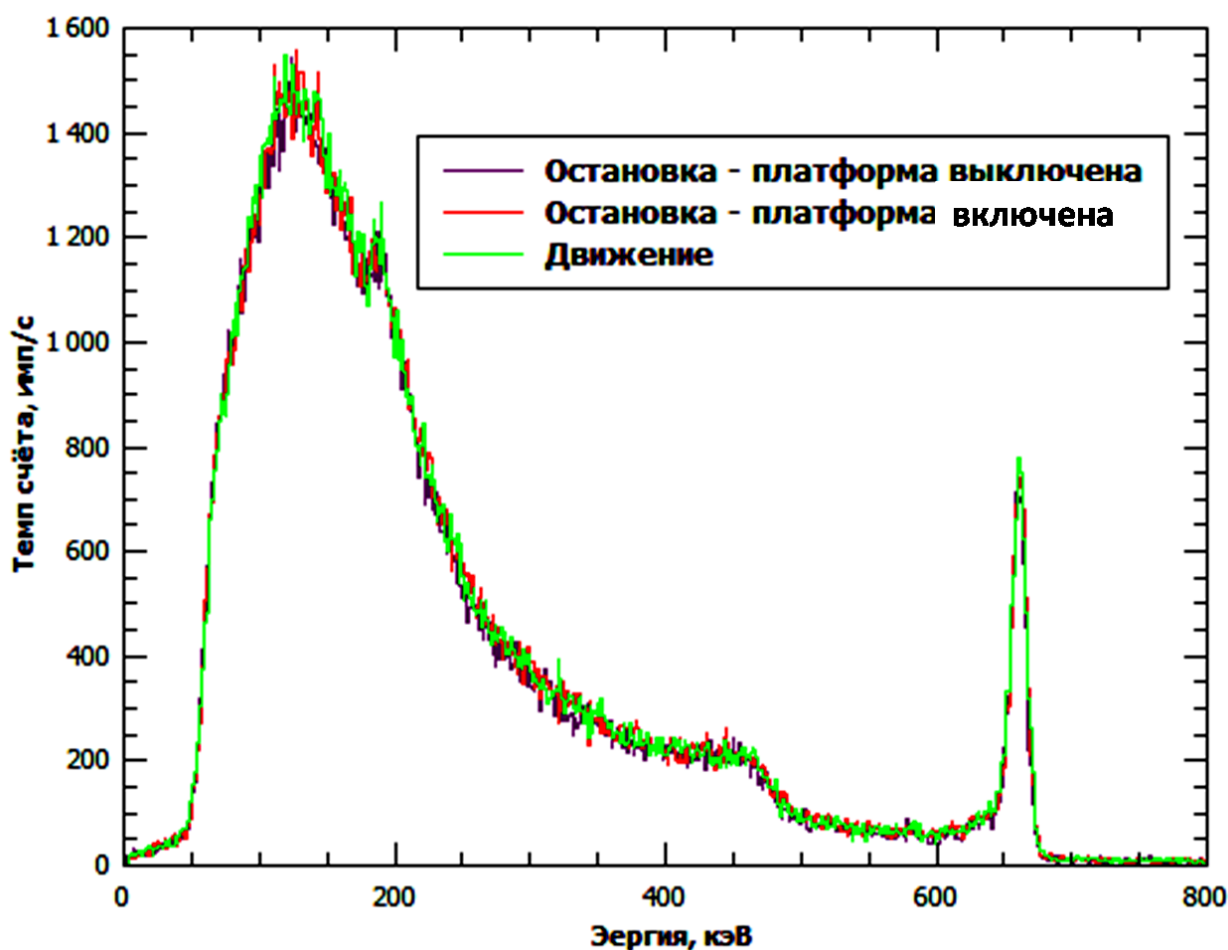


Рисунок 84. Спектры ^{137}Cs при различных условиях измерений.

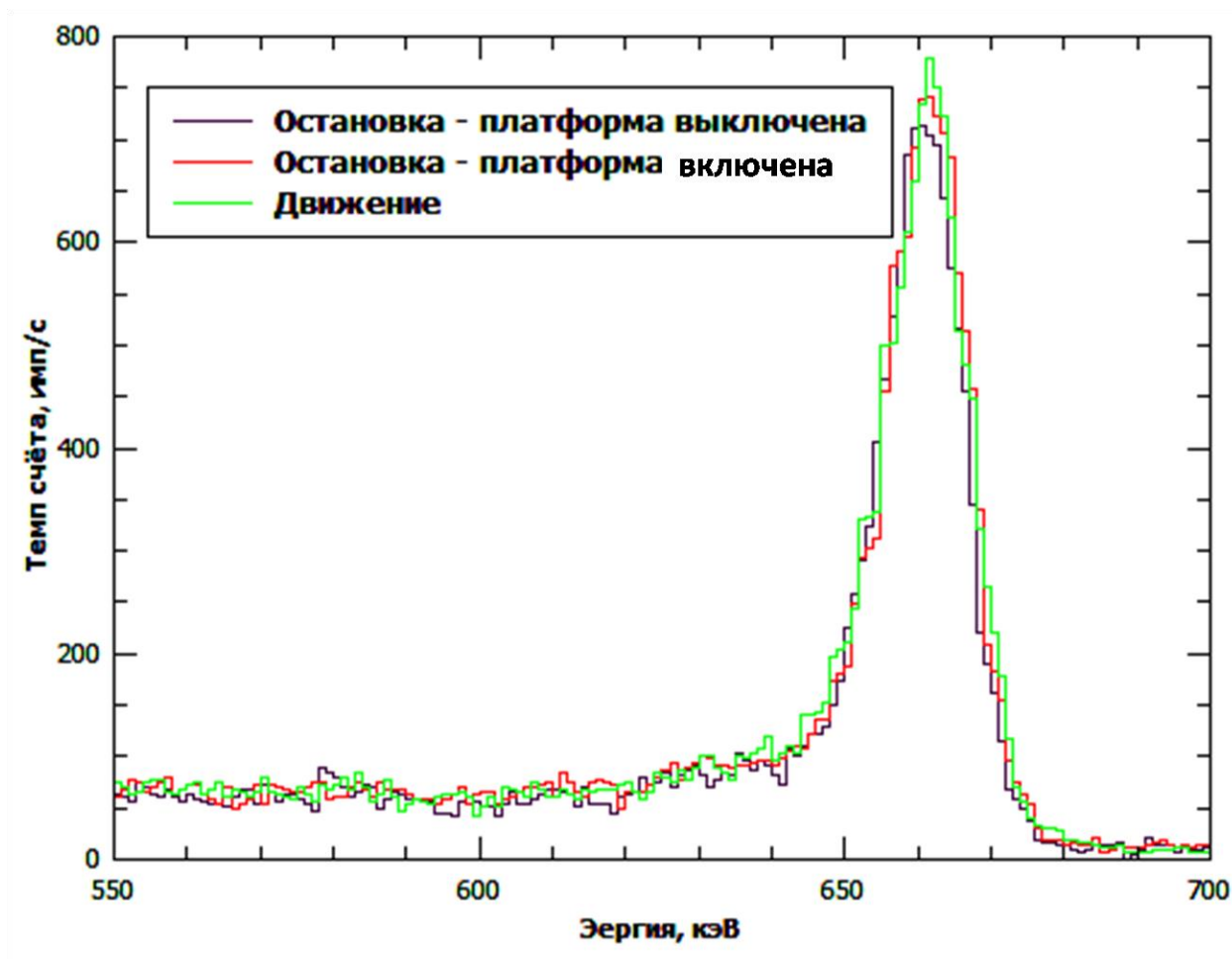


Рисунок 85. Пик полного поглощения 662 кэВ от источника ^{137}Cs при различных условиях измерений.

Энергетическое разрешение пика полного поглощения источника ^{137}Cs измеренного БГСК в состоянии покоя составило $1,95 \pm 0,03$ %. На рис.86 - 87 показан пик полного поглощения для случая остановки и для движения платформы.

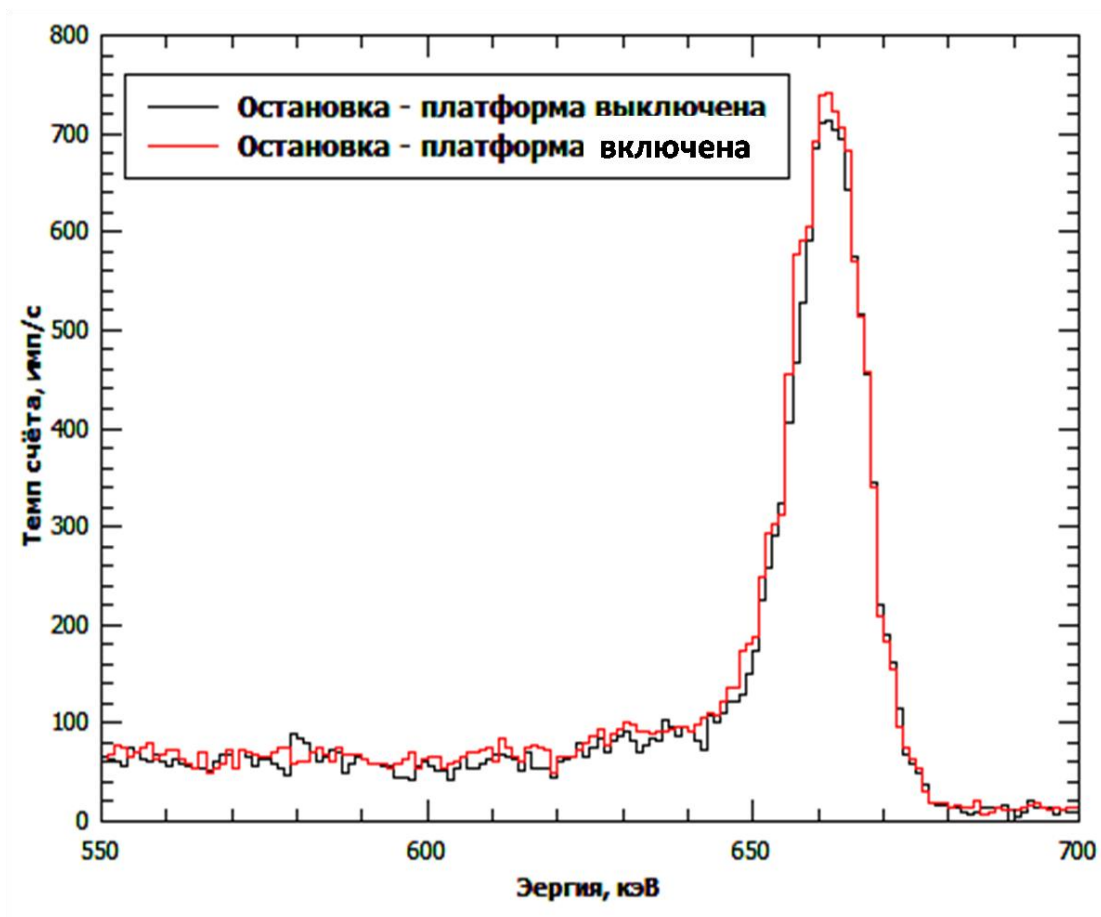


Рисунок 86. Пик полного поглощения с энергией 662 кэВ в условиях остановки платформы.

Спектр, измеренный, в момент остановки платформы с работающими двигателями имеет энергетическое разрешение $2,009 \pm 0,033$ %.

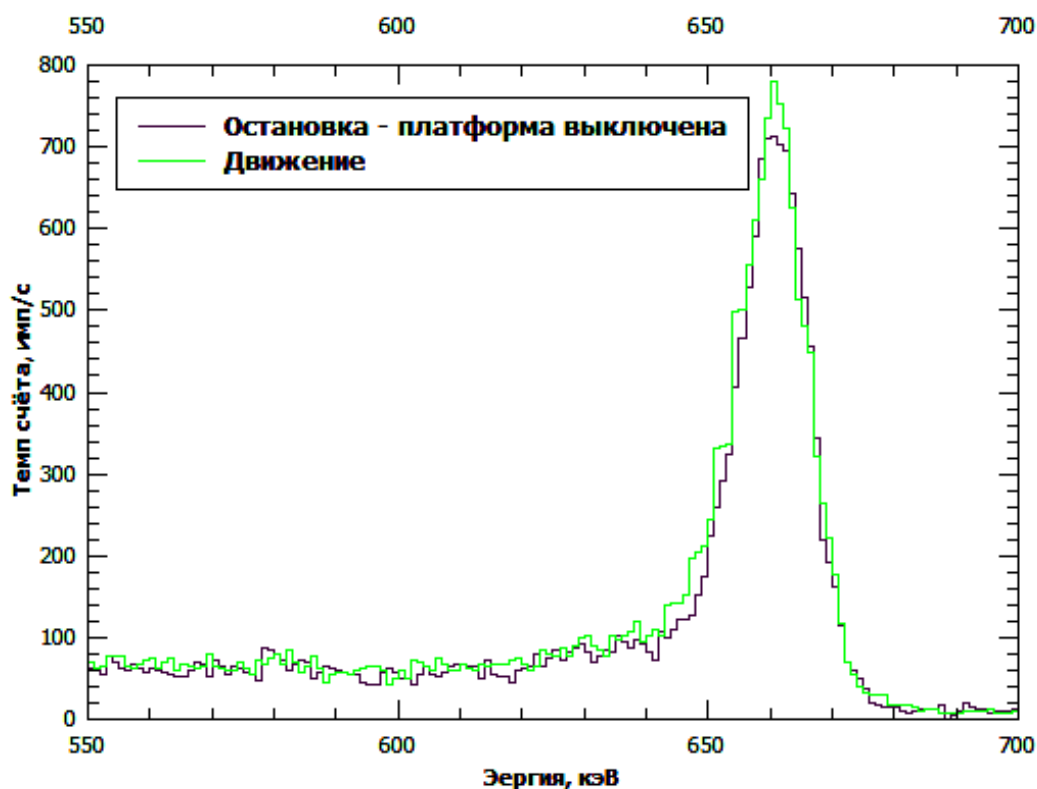


Рисунок 87. Пик полного поглощения с энергией 662 кэВ в условиях движения и выключенном состоянии двигателя платформы.

Спектр, измеренный, в момент движения платформы имеет энергетическое разрешение $2,047 \pm 0,030$ %.

Так как работающая роботизированная платформа создаёт шум в движении, а также шумит в состоянии остановки движения, было проведено сравнение спектров в движении, во включенном и выключенном состояниях (рис.86 – 87). На графиках показано, что спектры не претерпевают значительных изменений в результате шума издаваемого платформой и это не влияет на ухудшение энергетического разрешения КГС.

4.4 Испытания БГСК в полевых условиях НИЯУ МИФИ

В ходе тестирования были проведены измерения фона на исследуемых различных площадках НИЯУ МИФИ. На рис.88 и рис.89 представлены спектры фона, измеренные БГСК внутри здания и на улице.

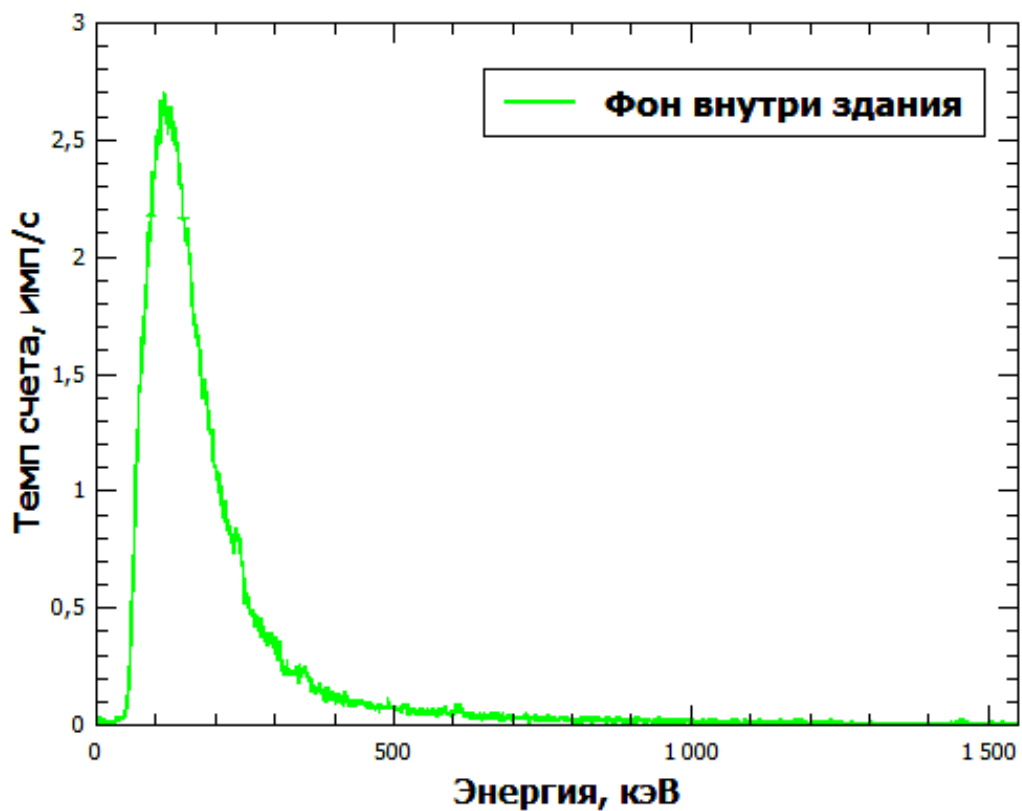


Рисунок 88. Спектр фона, измеренный БГСК внутри здания. Темп счета 297,4 имп/с.

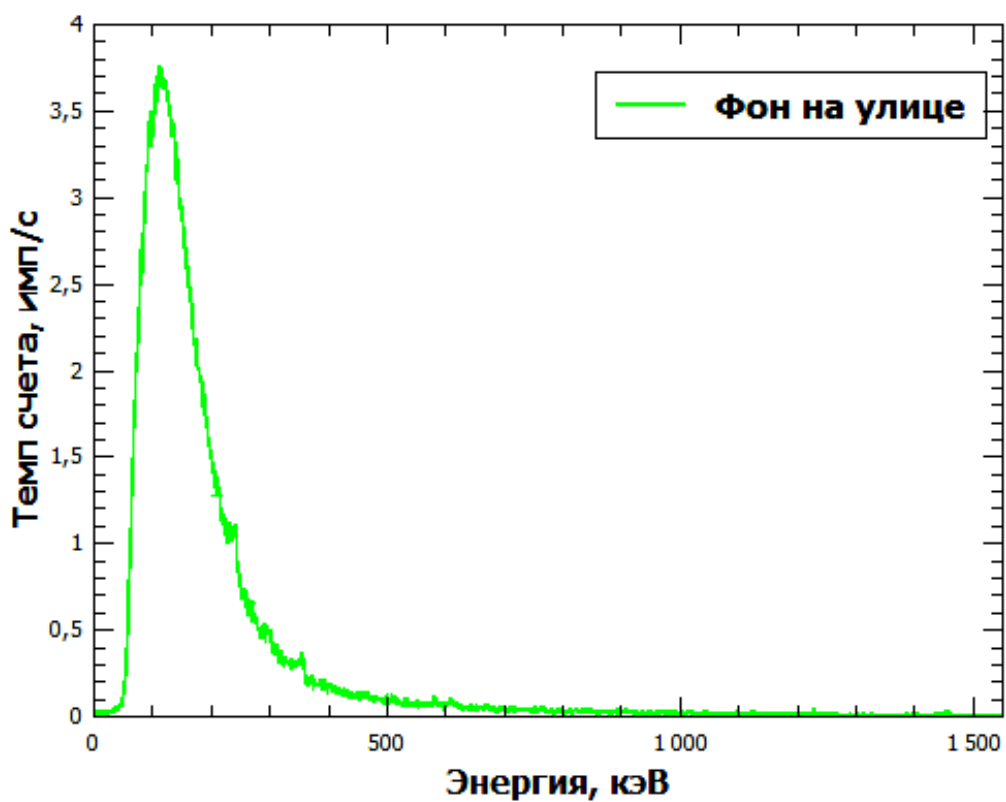


Рисунок 89. Спектр фона, измеренный БГСК на улице. Темп счета 411,3 имп/с.

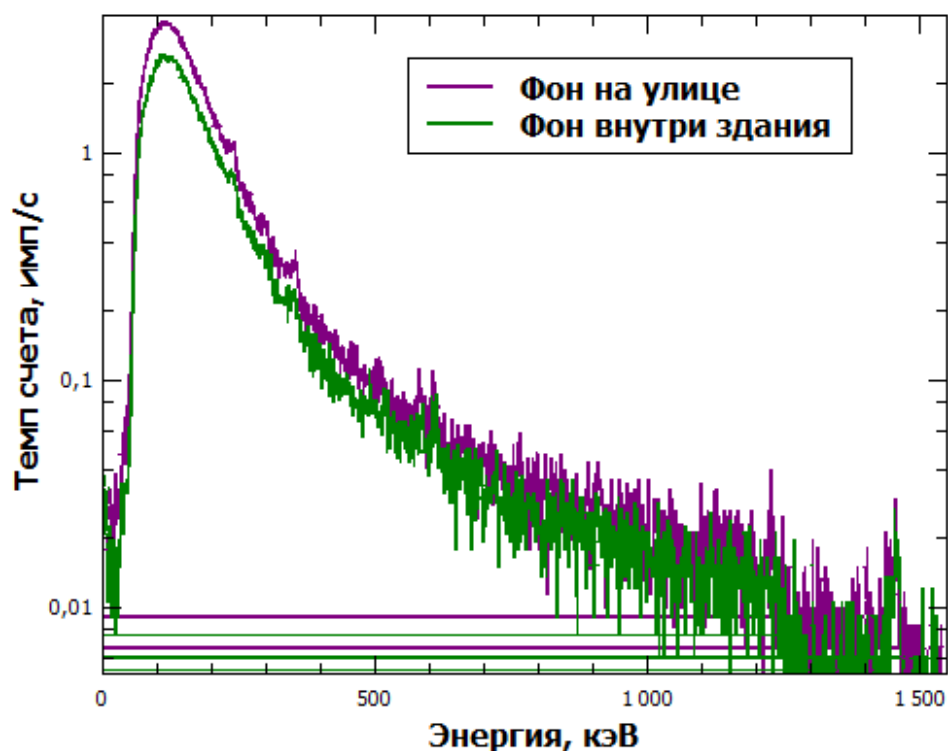


Рисунок 90. Спектры фона на улице и внутри здания.

При сравнении полученных спектров фона можно сделать заключение об отсутствии ухудшений результатов измерений при смене локации измерений. Незначительное расхождение в темпах счета фона рис.90 можно объяснить различием фонов в помещении и на улице.

4.5 Испытания БГСК на тестовых площадках МФ ФГУП «РАДОН»

БГСК был протестирован на пилотной площадке Московского филиала ФГУП «РАДОН» для задач обнаружения и локализации радиоактивных источников, а также демонстрации возможностей комплекса, в основе которого применяется ксеноновый гамма-спектрометр. Для апробации были подготовлены три различных участка:

- участок 1 представлял собой узкий коридор более 50 метров длиной в здании, где располагались лаборатории и кабинете сотрудников;
- участок 2 представлял собой подвал длиной более 50 м в здании, где проводились работы, лабораторные исследования и хранение различных образцов руды;

- участок 3 представлял собой уличную открытую площадку, засыпанную песком, с асфальтовой дорогой вокруг.

В ходе каждого измерения перед началом работ на каждом участке проводилось измерение фонового излучения, которое использовалось для задания порогового значения темпа счета системы оповещения БГСК. Затем комплекс исследовал площадку, непрерывно перемещаясь под управлением оператора для измерения темпов счета в разных точках маршрута. Анализируя темп счета каждую секунду, в случае превышения порогового значения в данной точке пути проводилось детальное измерение гамма-спектров в течение 100 секунд.

На участке 1 во время непрерывного перемещения наблюдались незначительные превышения фона в некоторых точках, в которых по итогам более длительных измерений не было подтверждено наличие какого-либо источника. Данный факт можно объяснить статистическими флуктуациями фона.

На участке 2 во время непрерывного перемещения наблюдались превышения фона в нескольких точках маршрута. Последующие детальные измерения в некоторых из обнаруженных точек позволили на основе анализа гамма-спектров обнаружить гамма-пикималой интенсивности от источника на основе руд радия.

На участке 3, располагавшемся на улице, при перемещении по маршруту наблюдались незначительные превышения фона в некоторых точках. После детальных измерений в обнаруженных точках только в одной из них БГСК смог подтвердить превышение фона более чем в 2 раза. Однако после анализа гамма-спектров не удалось выявить какие-либо радионуклиды, ставшие причиной данного превышения.

В результате проведения испытаний на пилотной площадке Московского филиала ФГУП «РАДОН», БГСК продемонстрировал возможность работы для решения задач радиационного контроля при обследовании уличных территорий и зданий, провел мониторинг

радиационной обстановки, осуществил детальные измерения спектров гамма-излучения в отдельных точках исследуемых участков.

Заключение к главе 4

Ксеноновый гамма-спектрометр, являющийся основой БГСК, обладает высоким энергетическим разрешением, температурной стабильностью и радиационной стойкостью, способен работать в сложных условиях. По итогам испытаний БГСК продемонстрировал возможность работы внутри зданий и на улице. В гамма-спектрах не наблюдается ухудшений спектрометрических характеристик КГС при смене локации измерений. За время испытаний на пилотной площадке Московского филиала ФГУП «РАДОН» были обследованы три участка: два в зданиях и один на улице. На каждом участке проводился набор фоновых гамма-спектров для выставления порога оповещения о превышении фона, выполнен проезд по территории участка в непрерывном режиме для мониторинга темпов счета и обнаружения превышений фона. Затем проведены детальные измерения в точках, где выявлено превышение фона для определения изотопного состава источников гамма-излучения.

В результате с помощью БГСК была продемонстрирована возможность решения задач радиационного контроля при обследовании уличных территорий и зданий, выполнен мониторинг радиационной обстановки, сделаны детальные измерения спектров гамма-излучения в отдельных точках исследуемых участков, обнаружены радиационные загрязнения, определен радионуклидный состав источника загрязнения и получена оценка его активности.

Заключение

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Исследованы физико-технические характеристики ксенонового гамма-спектрометра и показано, что КГС обладает высоким энергетическим разрешением, которое составляет 1,7 % для энергии гамма-квантов 662 кэВ, что в несколько раз лучше, чем у приборов на основе сцинтилляторов NaI и CsI. При этом ксеноновые гамма-спектрометры не требуют охлаждения в отличие от полупроводниковых спектрометров на основе сверхчистого германия, что позволяет широко применять КГС в полевых условиях. Кроме того, КГС обладает высокой температурной стабильностью и радиационной стойкостью.

2. Определена минимальная детектируемая активность КГС для различных изотопов. Для изотопа ^{137}Cs МДА составила 6,5 кБк, на расстоянии 50 см до источника сбоку детектора и 0,26 кБк с торца детектора для времени измерения 600 с.

3. Разработан и апробирован метод определения глубины залегания источников гамма-излучения с помощью энергетических спектров, измеренных ксеноновым гамма-спектрометром, на основе сравнения отношения площади пика полного поглощения к площади комптоновской долины. В результате анализа измеренных гамма-спектров определялись активность и радионуклидный состав гамма-источников. Полученные данные позволяют достоверно идентифицировать местоположение источника при проведении радиационного обследования и оценки количества РАО, образующихся при эксплуатации объектов использования атомной энергии.

4. Создан беспилотный гамма-спектрометрический комплекс, регистрирующим устройством на борту которого является ксеноновый гамма-детектор с высоким энергетическим разрешением. Гамма-спектрометрический комплекс позволяет проводить исследования ядерно-

физических установок, объектов окружающей среды и РАО в дистанционном режиме, что обеспечивает безопасность рабочего персонала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Считаю своим долгом выразить глубокую благодарность моим научным руководителям д. ф-м. н., зав. лабораторией элементарных частиц ФИАН, профессору кафедры Экспериментальная ядерная физика и космофизика ИЯФиТ НИЯУ МИФИ Полухиной Н.Г. и профессору кафедры Экспериментальной ядерной физики и космофизики ИЯФиТ НИЯУ МИФИ Дмитренко В.В., а также сотрудникам кафедры Власику К.Ф., Грачеву В.М., Шустову А.Е., Кривовой К.В., Улину С.Е. и Утешеву З.М. за неоценимую помощь в выполнении данной работы.

Список литературы

[1] Keir Groves¹, Emili Hernandez, Andrew West¹, Thomas Wright¹ and Barry Lennox. Robotic Exploration of an Unknown Nuclear Environment Using Radiation Informed Autonomous Navigation // Robotics 2021, 10(2), 78. doi: [org/10.3390/robotics10020078](https://doi.org/10.3390/robotics10020078).

[2] Keir Groves et al. Robotic Exploration of an Unknown Nuclear Environment Using Radiation Informed Autonomous Navigation // Advances in Robots for Hazardous Environments in the UK. 10(2), 78. 2021.

[3] Official web-site of TEPCO company. - URL: <http://www.tepco.co.jp> (accessed 17.07.2020). <https://irid.or.jp/en/topics/pcv%E5%86%85%E9%83%A8%E8%AA%BF%E6%9F%BB%EF%BC%8F1%E5%8F%B7%E6%A9%9F%E5%8E%9F%E5%AD%90%E7%82%89%E6%A0%BC%E7%B4%8D%E5%AE%B9%E5%99%A8%E5%86%85%E9%83%A8%E8%AA%BF%E6%9F%BB%EF%BC%88%E3%83%9A%E3%83%87/?print=1>.

[4] Tomas Lazna. Optimizing the localization of gamma radiation point sources using a UGV // Conference: 2018 ELEKTRO. doi:10.1109/ELEKTRO.2018.8398368

[5] Danilovich A. S, Smirnov, S. V et al. Radiological Survey of Contaminated Installations of Research Reactor before Dismantling in High Dose Conditions with Complex for Remote Measurements of Radioactivity // Conference: WM2012 Conference At: Phoenix, Arizona, USA (2012).

[6] Andrew W., et al. Use of Gaussian process regression for radiation mapping of a nuclear reactor with a mobile robot // Scientific Reports volume 11, Article number: 13975 (2021). doi: [org/10.1038/s41598-021-93474-4](https://doi.org/10.1038/s41598-021-93474-4).

[7] Kawatsuma et al. Unitization for portability of emergency response surveillance robot system: experiences and lessons learned from the deployment of the JAEA-3 emergency response robot at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants (2017) // Robomech J. 4:6, doi: 10.1186/s40648-017-0073-7.

[8] Maria Georgiou et al. characterization of “ γ -Eye”: a Low-Cost Benchtop Mouse-Sized Gamma Camera for Dynamic and Static Imaging Studies // Molecular Imaging and Biology. Volume 19, pp 398–407, (2017).

[9] Yoshida T., Nagatani K., Tadokoro S., Nishimura T., Koyanagi E. Improvements to the Rescue Robot Quince Toward Future Indoor Surveillance Missions in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant // Field and Service Robotics. 2013. Vol. 92. Pp. 19-32. doi: 10.1007/978-3-642-40686-7_2

[10] Miller A., Machrafi R., Mohany A. Development of a semi-autonomous directional and spectroscopic radiation detection mobile platform // Radiation Measurements. 2015. Vol. 72. pp. 53-59. doi: 10.1016/j.radmeas.2014.11.009

[11] Ducros C., Hauser G., Mahjoubi N., et al. RICA: A Tracked Robot for Sampling and Radiological Characterization in the Nuclear Field // Journal of Field Robotics, 2017, vol. 34, pp. 583-599. DOI: 10.1002/rob.21650

[12] Kawatsuma, S., Fukushima, M. and Okada, T. (2012), "Emergency response by robots to Fukushima Daiichi accident: summary and lessons learned" // Industrial Robot, Vol. 39 No. 5, pp. 428-435, doi: 10.1108/01439911211249715

[13] Tsitsimpelis I., Taylor C. J., Lennox B., Joyce M.J. A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments // Progress in Nuclear Energy, 2019, vol. 111, pp. 109-124. doi: 10.1016/J.PNUCENE.2018.10.023

[14] Novikov A.S. et al. New Modification Of Xenon Gamma-Ray Detector With High Energy Resolution // Optical Engineering, - 2013, - Vol. 53, № 2, P. 021108. doi: 10.1117/1.OE.53.2.021108

[15] А. Г. Исаев, В. В. Бабенко, А. С. Казимиров [и др.] Минимальная детектируемая активность. Основные понятия и определения // АНРИ. – 2010. – № 2(61). – С. 15-20. – EDNMVLTGP.

[16] Heath R.L. Scintillation Spectrometry Gamma-Ray Spectrum Catalogue, 2nd Edition, USAEC Report IDO-16880, 1964

[17] Комплексы программно-аппаратные гамма-спектрометрические NaПАК / Оф. сайт ООО «ЭкоСфера» [ekosf.ru](https://ekosf.ru/wp-content/uploads/2020/07/ot_nai_pak.pdf) – URL: https://ekosf.ru/wp-content/uploads/2020/07/ot_nai_pak.pdf(дата обращения: 28.02.2024).

[18] Standard Electrode Coaxial Ge (SEGe) Detectors. Copyright 2016 Mirion Technologies (Canberra), Inc.

[19] Ulin S.E. et al. New xenon gamma-ray spectrometer for sorting of radioactive waste // Proceedings SPIE, - 2016, Vol.9968, 99680 A. doi: 10.1117/12.2235742

[20] Ulin S. et al. Xenon Gamma-Ray Spectrometer for Radioactive Waste Controlling Complex // Journal of Physics: Conference Series, - 2016, - Vol. 675, № 4, P. 042023. doi: 10.1088/1742-6596/675/4/042023

[21] Маджидов А.И., Улин С.Е., Елохин А.П., Шустов А.Е. Особенности и способы защиты от техногенного акустического фона, влияющего на характер γ -спектров при проведении измерений КГС // Глобальная ядерная безопасность. 2024; 14 (4): 27-33. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-03>

[22] Petrenko D. et al. High-voltage power supply with improved thermosstability for Xenon gamma-ray spectrometer // J. Phys.: Conf. Ser., - 2016, Vol. 675. doi:10.1088/1742-6596/675/4/042038

[23] Власик К.Ф и др. Влияние потоков протонов и нейтронов на спектрометрические характеристики гамма-спектрометра на сжатом ксеноне // Приборы и техника эксперимента. – 1998. – № 3. с. 19.

[24] Ulin S. et al. Xenon Gamma-Ray Spectrometer for Radioactive Waste Controlling Complex // Journal of Physics: Conference Series, - 2016, - Vol. 675, № 4, P. 042023. doi: 10.1088/1742-6596/675/4/042023.

[25] Ulin S.E. et al. Application of xenon gamma-ray detectors in portal monitors for detection and identification of radioactive and fissile materials // Proceedings SPIE, - 2006, - Vol. 6319, P. 631917. doi: 10.1117/12.681111.

[26] Власик К.Ф. и др. Автоматизированная система на основе ксеноновых гамма-спектрометров для контроля газообразных радиоактивных

выбросов ядерного реактора // Ядерные измерительно-информационные технологии, - 2004, - Т. 2, СС. 45-53.

[27] Joyce M.J. и др. Finding the depth of radioactivity in construction materials // Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy. 2018. № 2 (166). с. 67-73.

[28] Madzhidov A.I. и др. Impact of Collimator and Absorber on the Spectra Measured with High Pressure Xenon Gamma-Ray Spectrometer Prototype // Radioactive Waste. 2024. № 1 (26). с. 26-34. doi: 10 .25283/258 - 9707-2024-1-26-34

[29] Demin V.M., Kolodin E.M., Panin M.P. Determination of ^{137}Cs Radioactive Contamination over Soil Depth Using a Xenon Spectrometer // Atomic Energy. - 2021. - 15738205 10634258.

[30] Lee B и др. Radiological analysis for radioactivity depth distribution in activated concrete using gamma-ray spectrometry // Applied Radiation and Isotopes. 2021. № December 2020 (169). С. 109558.

[31] Morris O и др. Physical and Chemical Properties of Crushed Ceramic and Porcelain Clay Tile Powder // International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research (IJIEASR). 2018. № 7 (7). с. 1–5.

[32] International Atomic Energy Agency Vienna (Austria) N. D. S. XMuDat: Photon attenuation data on PC Version 1.0.1 of August 1998 Summary documentation 1998. с. 2.

[33] Ba, Vu & Truong, Loan, Huy, Ngo. Evaluation of characteristics of the peak-to-valley ratio versus material thickness in transmission gamma spectra by Monte Carlo simulation //Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2018. DOI:317. 10.1007/s10967-018-6035-6.

[34] Роботизированный автомобиль WHEELTEC Ackerman ROS с независимой подвеской / Оф. Сайт интернет-магазин «Суперайс» supereyes.ru URL:https://supereyes.ru/catalog/roboty_nvidia_jetson_nano/robotizirovannyy_avtomobil_wheeltec_ackerman_ros/ (дата обращения: 28.02.2024).

[35] Маджидов А.И., Дмитренко В.В. и др. Использование роботизированного гамма-комплекса для обнаружения и идентификации радиоактивных источников // ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. Труды 34 - й Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА», 23-24 ноября 2023 г., СС 178-187. doi.org/10.31776/ConfER.34.2023