

На правах рукописи

МАДЖИДОВ АЗИЗБЕК ИСТАМОВИЧ

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

Специальность 1.3.2 –
Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

**Научный
руководитель:**

Полухина Наталья Геннадьевна

доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией элементарных частиц ФИАН, профессор кафедры «Экспериментальная ядерная физика и космофизика» Института ядерной физики и технологии НИЯУ МИФИ, г. Москва

**Официальные
оппоненты:**

Смирнова Лидия Николаевна

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей ядерной физики физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, г. Москва

Титаренко Юрий Ефимович

доктор физико-математических наук, профессор, начальник лаборатории Фундаментальных ядерно-физических исследований Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (ККТЭФ НИЦ «Курчатовский институт»), г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук

Защита состоится «24» сентября 2025 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.03 на базе ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте института www.lebedev.ru

Автореферат разослан «30» июня 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.262.03
доктор физико-математических наук

Баранов Сергей Павлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 следующее 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 работе.

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 ($0-90^\circ\text{C}$);
- 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 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 печатных 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.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения; содержит 107 страниц, 90 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 35 публикаций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна, научная и практическая значимость.

В **первой главе** приведен обзор современных беспилотных гамма-спектрометрических комплексов и представлены области их применения в различных условиях.

В настоящее время существуют различные беспилотные комплексы, оснащённые гамма-измерительной аппаратурой для разнообразных фундаментальных и прикладных задач в области ядерной физики. Особый интерес представляют комплексы, имеющие высокую проходимость, большое время работы, работоспособность при наличии сложных внешних воздействий, качественное дистанционное управление, надежную передачу данных и т.д. Измерительные приборы, устанавливаемые на борту таких комплексов должны обладать высоким энергетическим разрешением, температурной стабильностью, стойкостью к акустическим и радиационным воздействиям. В связи с этим необходимо создание новых беспилотных гамма-спектрометрических комплексов, удовлетворяющих вышеуказанным требованиям.

На сегодняшний день широко применяются такие беспилотные комплексы как роботы-манипуляторы или грузоподъемные роботы для ремонтных работ, а также роботы, использующиеся для оценки радиационной обстановки окружающей среды, радионуклидного состава обнаруженных радиоактивных загрязнений, качественного и количественного анализа радионуклидов. Существующая измерительная аппаратура на борту автоматизированных и роботизированных комплексов имеет как свои достоинства, так и недостатки. Так, например, детектор на основе кристалла $CdZnTe$, использовавшийся на работе RICA для характеристики РАО в АЭС «Фукусима-1» имел энергетическое разрешение 4 % на гамма-линии 662 кэВ [2], но обладал невысокой радиационной стойкостью. Разработанный учеными Курчатовского института роботизированный комплекс Brokk-90 с гамма-детектором на основе $CsI(Tl)$, применялся для дистанционных измерений радиоактивности ядерно-физических установок и при этом имел разрешение 8 % на линии 662 кэВ [3]. Недостатками детектора являлось

невысокое энергетическое разрешение и зависимость его характеристик от температуры.

Целью работы стала разработка нового беспилотного комплекса на основе ксенонового гамма-спектрометра, использующего в качестве рабочего вещества сжатый ксенон. Такие детекторы на основе импульсной цилиндрической ионизационной камеры с экранирующей сеткой были созданы в НИЯУ МИФИ и активно используются как в учебно-методических, так и в научно-исследовательских целях [4, 5].

Во второй главе дано описание ксенонового гамма-спектрометра, который используется в качестве регистрирующего устройства на борту БГСК.

Составной частью КГС является заполненный смесью сжатого ксенона с водородом ксеноновый гамма-детектор (КГД) на основе цилиндрической импульсной ионизационной камеры с экранирующей сеткой (рис.1).

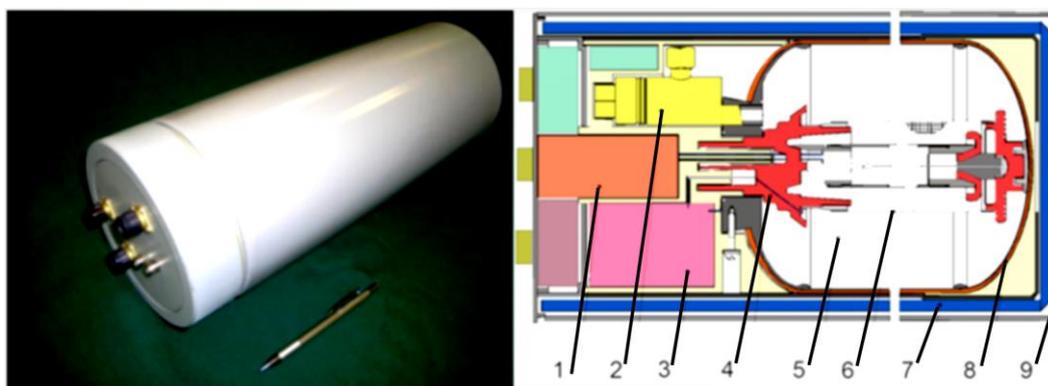


Рисунок 1. Фотография и схема КГС: 1 - зарядочувствительный усилитель, 2 - кран для наполнения рабочим веществом, 3 - источник питания, 4 - керамический гермоввод, 5 - ионизационная камера, 6 - экранирующая сетка, 7 - тефлоновая изоляция, 8 - стальной корпус с композитным покрытием, 9 - внешний защитный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

По измеренным спектрам от гамма-источников типа ОСГИ была определена минимальная детектируемая активность (МДА) КГС. 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 1.

Таблица 1. Минимальная детектируемая активность КГС.

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

По сравнению с детекторами на основе сцинтилляционных и полупроводниковых кристаллов КГС обладает следующими преимуществами:

- энергетическое разрешение в несколько раз лучше, чем у приборов на основе сцинтилляторов NaI и CsI;
- для работы не требует охлаждения, в отличие от полупроводниковых спектрометров на основе сверхчистого германия;
- способен работать в условиях вибро-акустических воздействий до 80 дБ без ухудшения энергетического разрешения [5-6];
- сохраняет работоспособность при температурах до 90°C без изменения спектрометрических характеристик прибора [7];
- обладает радиационной стойкостью, сохраняя спектрометрические характеристики при прохождении через детектор флюенса нейтронов $1,5 \cdot 10^{10}$ частиц [8].

Возможности применения различных модификаций таких гамма-спектрометров проверялись ранее в составе опытного образца комплекса по сортировке радиоактивных отходов [9], портального комплекса для контроля пассажиропотока [10], автоматизированной системы для контроля

газообразных радиоактивных выбросов ядерного реактора [11]. Положительные результаты данных исследований продемонстрировали возможность применения КГС для задач 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.

В третьей главе приводятся, результаты моделирования работы комплекса и экспериментов, связанных с определением глубины залегания радиоактивных источников с использованием ксенонового гамма-спектрометра.

Одним из лучших современных методов определения глубины радиоактивного загрязнения является анализ рассеянной части спектра в области, так называемой «комптоновской долины» [12], которая соответствует зоне между пиком полного поглощения и правым краем комптоновского распределения (рис.2).

Моделирование функции отклика КГС проводилось методом Монте-Карло с использованием пакета библиотек Geant4 [13] и учетом конструктивных характеристик детектора. В модели и эксперименте использовался источник гамма-излучения ^{137}Cs с энергией 662 кэВ, перед которым располагались керамические плитки размером $20 \times 15 \times 0,65 \text{ см}^3$ в количестве до 12 штук на расстоянии 26 см от торца КГС (рис.4).

Рис. 2а демонстрирует совпадение спектров в области пика полного поглощения (662 кэВ) и комптоновской долины для результатов моделирования и экспериментально измеренных КГС гамма-спектров источника ^{137}Cs . На рис.2б представлены изменения площадей комптоновской долины и пика полного поглощения гамма-квантов с энергией 662 кэВ при прохождении через различное количество слоев поглотителя (керамика).

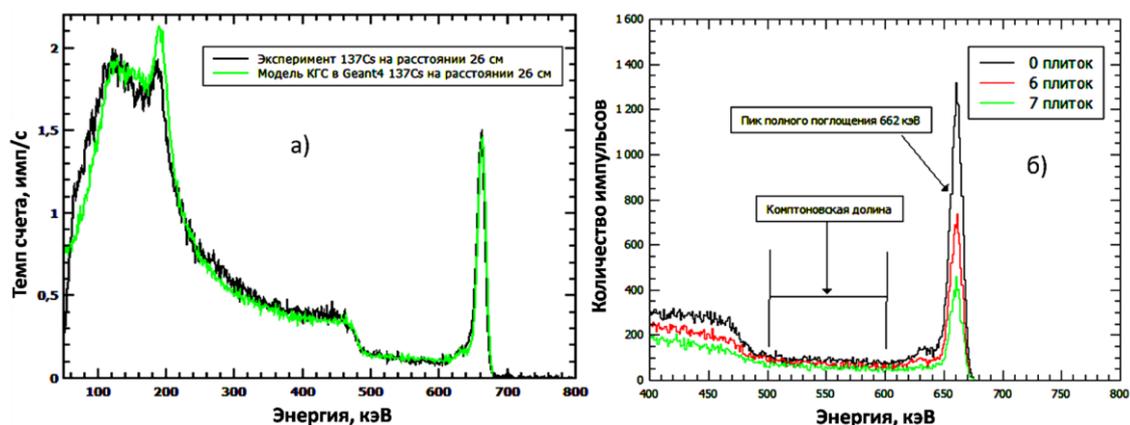


Рисунок 2. Энергетический спектр источника ^{137}Cs , рассчитанный в моделировании и измеренный КГС (а), измеренный КГС гамма-спектр источника ^{137}Cs , представляющий пики полного поглощения и комптоновские долины для различного количества керамических плиток (б)

По полученным результатам моделирования были построены зависимости отношения площади пика полного поглощения к площади комптоновской долины от толщины керамических плиток и алюминия (рис.3).

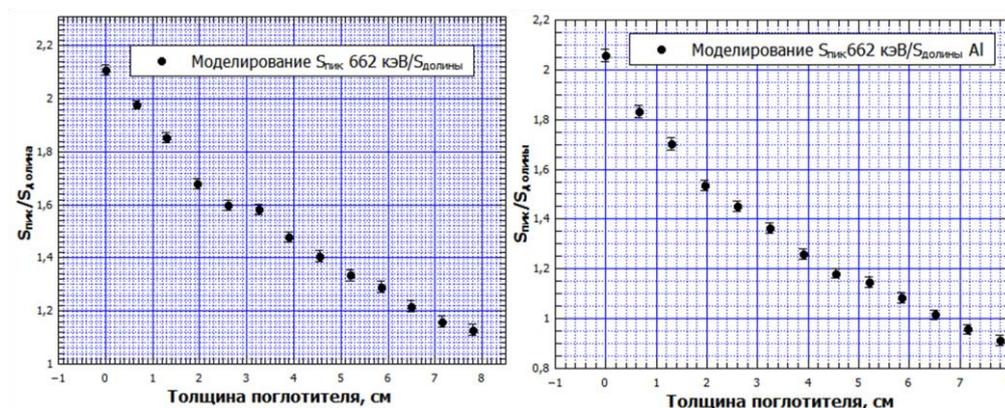


Рисунок 3. График зависимости отношение площади пика полного поглощения к площади долины от толщины поглотителя (керамика (а) и алюминий (б))

Видно, что при увеличении толщины поглотителя значение отношения площади пика полного поглощения к площади долины уменьшается.

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

Были проведены экспериментальные исследования с различными поглотителями, которые располагались между торцом КГС и гамма-источниками типа ОСГИ (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba и ^{152}Eu) (рис.4).

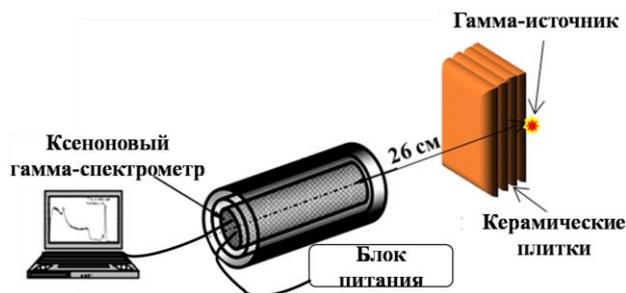


Рисунок 4. Схема эксперимента

Перед каждым экспериментом измерялось фоновое гамма-излучение в лаборатории, которое учитывалось при обработке экспериментальных данных.

При обработке гамма-спектров границы комптоновской долины выбирались для источника ^{60}Co от 1200 до 1280 кэВ, ^{137}Cs от 500 до 600 кэВ, ^{133}Ba от 310 до 335 кэВ, ^{152}Eu от 255 до 325 кэВ.

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.5). Площадь комптоновской долины вычислялась для указанных выше энергетических диапазонов, а пиков полного поглощения – после аппроксимации пиков распределением Гаусса.

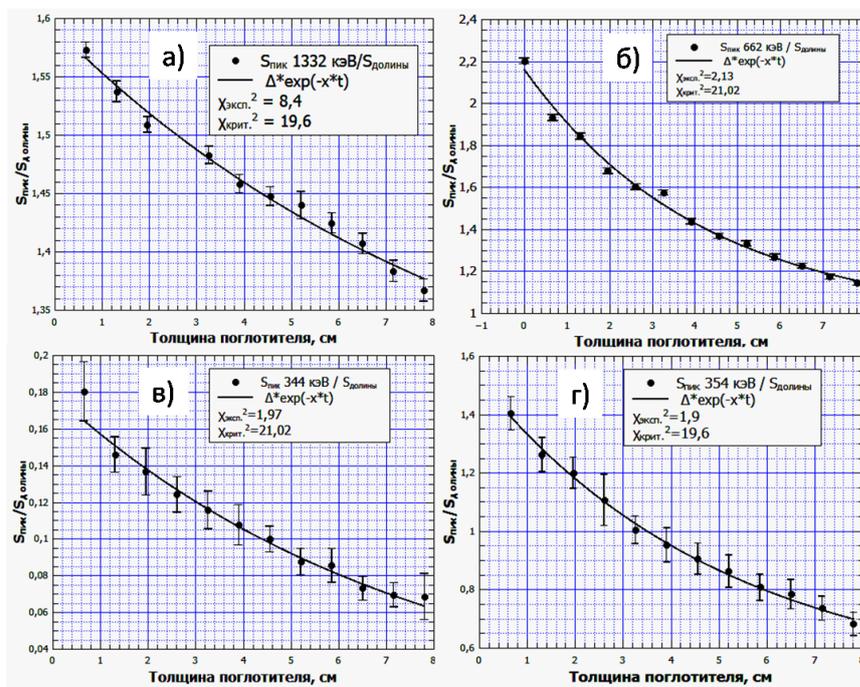


Рисунок 5. Зависимость отношения площади пика полного поглощения и комптоновской долины $S_{\text{пик}}/S_{\text{долины}}$ от толщины слоя керамики для различных источников гамма-излучения а) ^{60}Co , б) ^{137}Cs , в) ^{133}Ba , г) ^{152}Eu

На рис.6 для энергии гамма-квантов 662 кэВ представлены полученные в результате проведения экспериментов [14] графики отношения темпов счета площади пика полного поглощения к площади комптоновской долины от толщины различных поглотителей (керамика, алюминий, почва, вода),

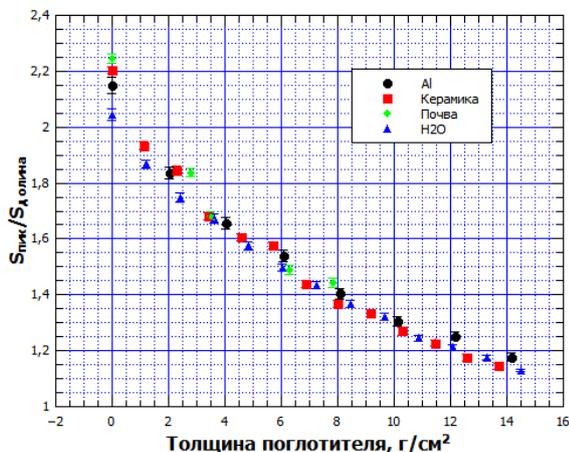


Рисунок 6. Графики экспериментальных зависимостей отношения темпов счета площади пика полного поглощения для энергии гамма-квантов 662 кэВ к площади комптоновской долины от толщины поглотителя для различных материалов (керамика, алюминий, почва, вода)

В таблице 2 представлены результаты расчетов точности определения глубины залегания радиоактивного источника ¹³⁷Cs активностью 100 кБк за время измерения 60 минут для различных поглотителей.

Таблица 2. Точность определения глубины залегания источника ¹³⁷Cs в различных поглотителях.

Поглотитель	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

Проведено сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования методом Монте-Карло с использованием пакета библиотек Geant4 с учетом конструктивных характеристик КГС, соответствующих реальной измерительной установке (рис.7). В моделировании использовались гамма-кванты с энергией 662 кэВ.

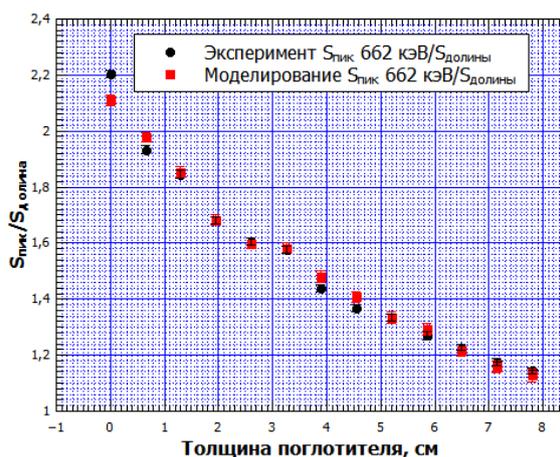


Рисунок 7. График зависимости отношения темпа счета площади пика полного поглощения для энергии гамма-квантов 662 кэВ к темпу счета площади комптоновской долины от толщины поглотителя (керамика)

Из рис.7 видно, что экспериментальные результаты и результаты моделирования, полученные с использованием метода Монте-Карло в Geant4 совпадают в пределах погрешностей.

По результатам экспериментов с ксеноновым гамма-спектрометром и гамма-источниками ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu , располагавшимися за различными поглотителями, удалось продемонстрировать, что представленная методика 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.

В четвертой главе дается описание лабораторных и полевых испытаний беспилотного гамма-спектрометрического комплекса.

КГС был установлен на борту дистанционно управляемой платформы для решения следующих задач:

- построение двумерной карты местности;

- определения положения, активности и радионуклидного состава источников гамма-излучения.

Испытания роботизированной платформы проходили в радиационной лаборатории НИЯУ МИФИ (рис.8а). На рис.8б показана блок-схема ПО для удаленного управления БГСК.

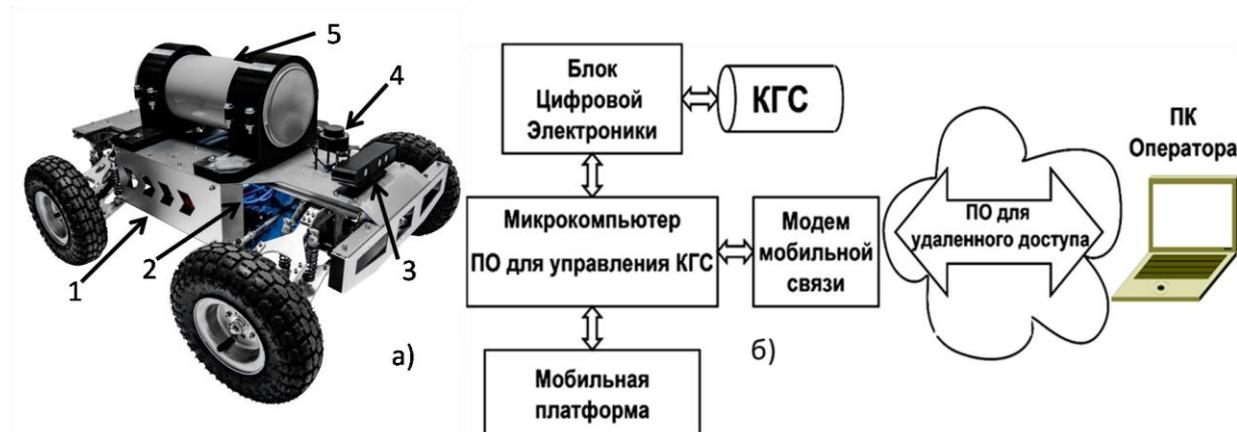


Рисунок 8. Беспилотный гамма-спектрометрический комплекс (а): 1 – мобильная платформа, 2 – блоки электроники, 3 – видеочамера, 4 – LIDAR (лазерный дальномер), 5 – КГС; (б): блок-схема организации удаленной связи и управления БГСК

Управление БГСК и проведение измерений осуществляются с использованием системы дистанционной связи на основе микрокомпьютера на базе одноплатной системы Raspberry Pi 4 B+, работающего под управлением операционной системы Raspbian OS. Для данной операционной системы было создано оригинальное программное обеспечение (ПО) «Spectrum Control» на языке Python для управления ксеноновым гамма-спектрометром. ПО позволяет контролировать набор гамма-спектров, считывать спектрометрические данные из блока цифровой электроники КГС, отображать на экране компьютера полученную информацию, 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.

Для организации удаленного подключения к БГСК используется программное обеспечение с открытым кодом Rust Desk. Данное ПО позволяет в режиме сервер-клиент установить соединение с удаленным рабочим столом

Raspbian OS, дистанционно проводить измерения и управлять БГСК. Для поддержания соединения необходимым условием является наличие мобильной связи и модема для подключения Raspberry Pi к сети интернет.

На рис.9 продемонстрирован экран рабочего стола при работе оператора с БГСК. В правом нижнем углу окно мониторинга темпа счета гамма-квантов, справа сверху энергетический спектр, измеряемый КГС, слева окно программы управления мобильной платформой с картой местности, построенной при помощи системы LIDAR, и изображением с камеры контроля за перемещением комплекса.

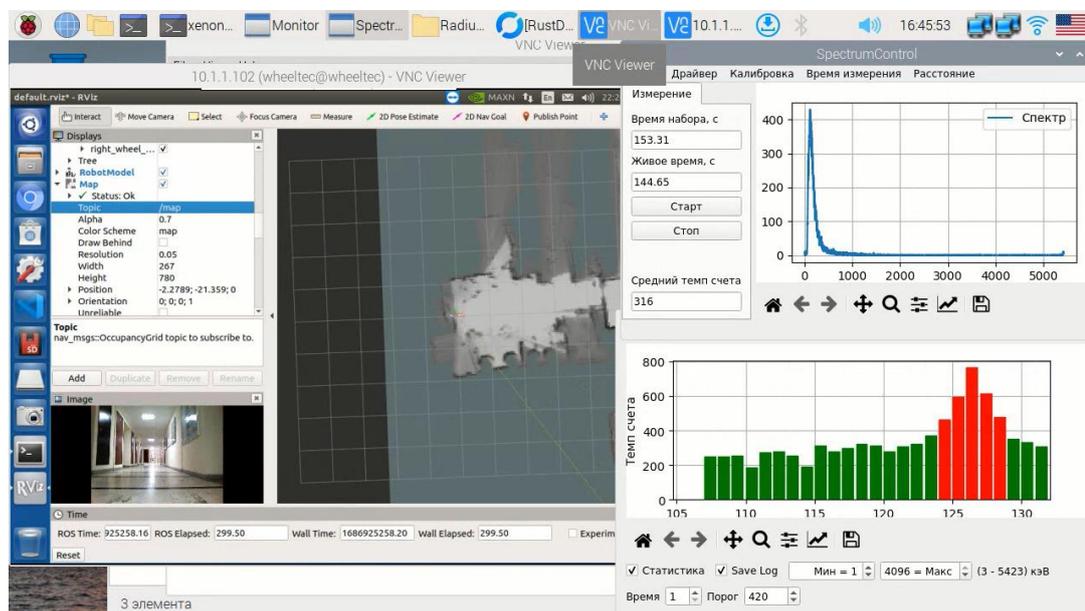


Рисунок 9. Изображения удаленного рабочего стола БГСК

В ходе лабораторных измерений использовались одновременно два радиоактивных источника на основе изотопов ^{60}Co и ^{137}Cs типа ОСГИ.

В эксперименте было сделано более 30 измерений гамма-спектров длительностью 60 с для каждого набора. Измерения проводились в коридоре лаборатории НИЯУ МИФИ. Для построения карты активностей беспилотная платформа двигалась вдоль стен коридора таким образом, чтобы на каждом прямом треке было по 10 точек остановки [15].

В таблице 3 представлены координаты точек измерения гамма-спектров.

Таблица 3 – Положения платформы в разных точках

	Координата, м		Координата, м		Координата, м
--	---------------	--	---------------	--	---------------

Точка	Номер линии	X	Y	Точка	Номер линии	X	Y	Точка	Номер линии	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

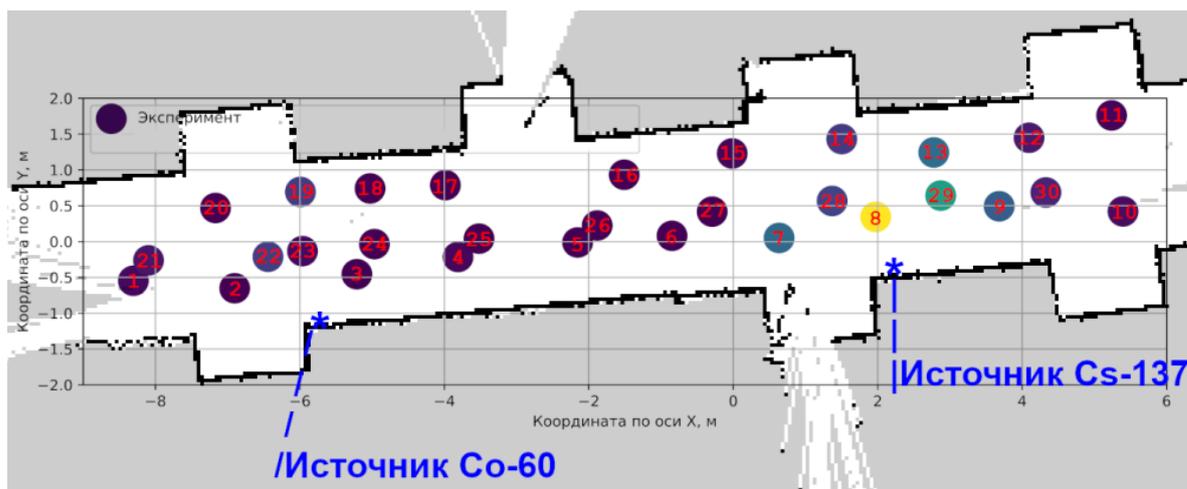


Рис.10 Положения точек на карте

На рис.10 показаны расположения точек, в которых проводились измерения, и их порядковый номер.

Примеры гамма-спектров, измеренных в различных точках показаны на рис.11. Точки 1 и 2 располагались недалеко от источника ^{60}Co и в спектрах можно видеть линии 1173,2 и 1332,5 кэВ, соответствующие данному изотопу.

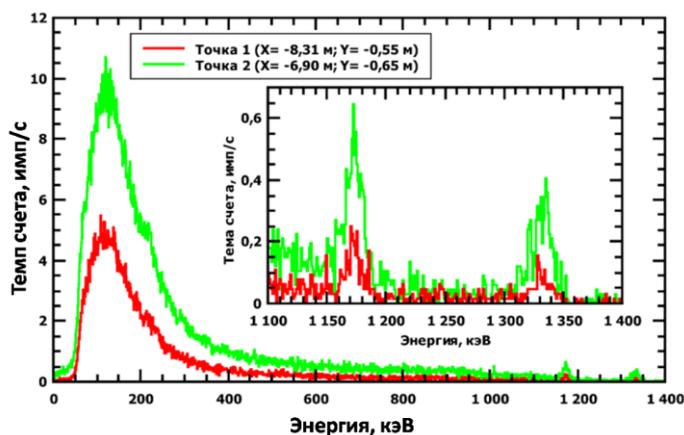


Рисунок 11. Гамма-спектры, измеренные в разных точках

Максимальные темпы счета для каждой линии находятся в области, расположенной ближе всего к используемым источникам. На графиках

(рис.12,13) отмечено положение источника, найденное методом наименьших квадратов в предположении, что темп счета подчиняется функции вида:

$$f(x, y, x_0, y_0, A, B) = B + \frac{A}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (1)$$

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.12 и 13 представлены распределения темпов счета, совмещенные с картой исследуемой территории. Синей звездой отмечено истинное положение источника.

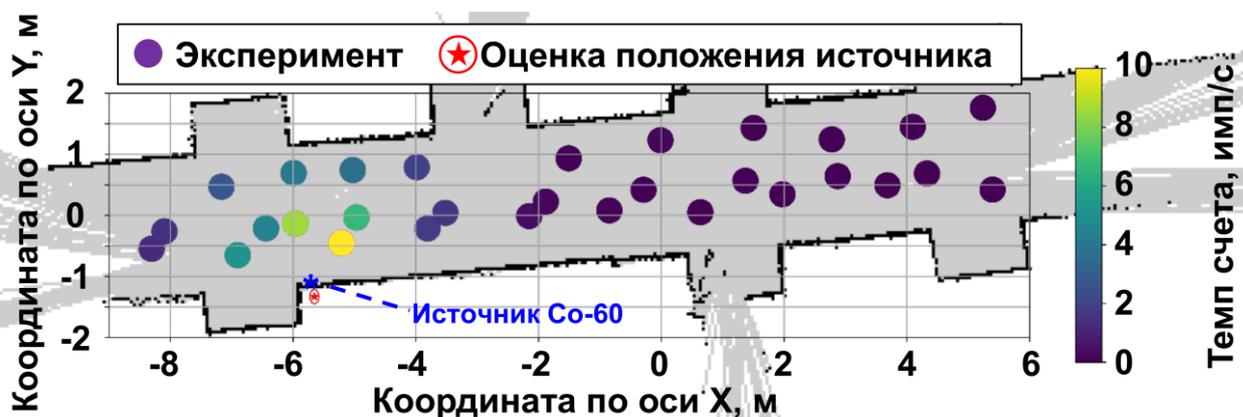


Рисунок 12. Распределение темпов счета и положение источника на карте для анализа пиков 1173 кэВ и 1332 кэВ

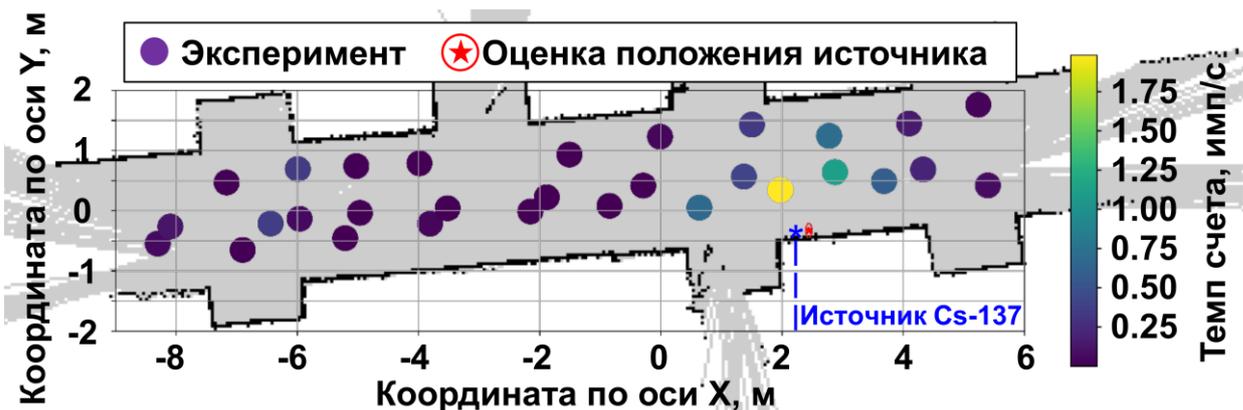


Рисунок 13. Распределение темпов счета и положение источника на карте для анализа пика 662 кэВ

Таблица 4. Истинные и найденные координаты источников.

Изотоп	¹³⁷ Cs		⁶⁰ Co			
	661,7		1173,2		1332,5	
Координата	X	Y	X	Y	X	Y
Истинное положение, м	2,2 ±0,2(сист)	-0,4 ±0,2(сист)	-5,8 ±0,2(сист)	-1,1 ±0,2(сист)	-5,8 ±0,2(сист)	-1,1 ±0,2(сист)
Найденное положение, м	2,44 ±0,2(сист) ±0,05(стат)	-0,33 ±0,2(сист) ±0,12(стат)	-5,64 ±0,2(сист) ±0,08(стат)	-1,39 ±0,2(сист) ±0,13(стат)	-5,65 ±0,2(сист) ±0,07(стат)	-1,33 ±0,2(сист) ±0,12(стат)
Отклонение, м	0,24	0,07	0,16	0,29	0,15	0,23

Следует отметить, что в эксперименте оба источника располагались рядом со стеной коридора и в результате анализа получены непротиворечивые значения координат, которые позволяют локализовать источник (таблица 4). Полученные отклонения могут быть объяснены малым количеством измерений рядом с источником, ошибками определения координат, которые выдает программа управления перемещением платформы.

Таким образом, мобильная платформа с ксеноновым гамма-спектрометром позволяет проводить измерение полей гамма-излучения на исследуемой территории с последующим анализом положения гамма-источников. Дополнительная обработка гамма-спектров позволяет находить положение точечных гамма-источников для каждого изотопа при помощи анализа темпов счета в пике полного поглощения.

Общая длительность работы комплекса в эксперименте составила порядка 2-х часов. Система питания в беспилотном комплексе организована таким образом, что у каждой системы (мобильная платформа, ксеноновый гамма-спектрометр, одноплатный компьютер для управления КГС) имеются независимые друг от друга источники питания. При этом наибольший расход энергии был у мобильной платформы.

Исходя из приведенных результатов, можно сделать вывод, что беспилотный гамма-спектрометрический комплекс может использоваться для контроля радиационно-опасных территорий и обеспечивать, таким образом, безопасные условия работы персонала в зонах экстремального облучения [16].

ВЫВОДЫ

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.

Список литературы

[1] Kniazewyc B. G., Irving J. T., Long D. C., Wagoner H. The implication of remote technology for decontamination activities. Proceedings of the Nineteenth Midyear Topical Symposium Health Physics Society, 1986, pp. 261– 270.

[2] 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.

[3] Danilovich A. S., Potapov V. N., Smirnov S. V. The remote-controlled spectrometric system for searching and characterization of high-level radioactive waste. EPJ Web of Conferences, 2020, vol. 225. DOI: 10.1051/epjconf/202022506002.

[4] 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

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

[6] 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>

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

[8] 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

[9] 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

[10] 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

[11] 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

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

[13] GEANT4 TOOLKIT [Электронный ресурс]: Пакет моделирования взаимодействия частиц с веществом. URL <http://geant4.cern.ch>.

[14] Маджидов А.И., Дмитренко В.В. и др. Влияние коллиматора и поглотителя на спектры, измеренные с помощью прототипа ксенонового гамма-спектрометра // Радиоактивные отходы. 2024. № 1 (26). С. 26-34. DOI: 10.25283/258-9707-2024-1-26-34.

[15] Madzhidov A.I., Dmitrenko V.V. et al. An automated and robotic complex based on a xenon gamma-ray spectrometer for performing tasks for decommissioning nuclear and radiation hazardous facilities and monitoring the development of radioactive waste // Journal of Physics: Conference Series, 2023 // 2023 Vol. 2642, No.1, doi: 10.1088/1742-6596/2642/1/012011.

[16] Маджидов А.И., Дмитренко В.В. и др. Использование роботизированного гамма-комплекса для обнаружения и идентификации радиоактивных источников // Extreme Robotics. 2024г. Вып. 1 Стр. 178-187.

Список публикаций автора по теме диссертационной работы

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, базы данных Web of Science и Scopus:

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, А. И. 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