

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 621.384.6, 61

Рег. № 125071608531-1

Рег. №



УТВЕРЖДАЮ
И.о. директора ИЯИ РАН,
чл.-кор. РАН

M.V. Либанов

«30» декабря 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ МЕТОДАМИ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
(промежуточный за 2025, этап 1)

ФЦП

Руководитель НИР,
гл. науч. сотр.,
чл.-корр. РАН

30.12.2025 Л.В. Кравчук

подпись, дата

Москва 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
гл. науч. сотр.,
член-корр. РАН,
доктор технических наук


30.12.2025
подпись, дата

Л.В. Кравчук
(введение, разделы 1-17, заключение)

Исполнители:
Гл. науч. сотр., зав. лаб.,
д-р хим. наук


30.12.2025
подпись, дата

Б.Л. Жуйков
(введение, раздел 1, 2)

Вед. науч. сотр.,
д-р хим. наук


30.12.2025
подпись, дата

С.В. Ермолаев
(раздел 2, 3, 4)

Ст. науч. сотр.,
канд. хим. наук


30.12.2025
подпись, дата

Е.В. Лапшина
(раздел 3)

Ст. науч. сотр.,
канд. хим. наук


30.12.2025
подпись, дата

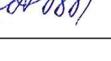
В.М. Чудаков
(раздел 1)

Ст. науч. сотр.,
канд. хим. наук


30.12.2025
подпись, дата

А.Н. Васильев
(раздел 2, 3)

Мл. науч. сотр.


30.12.2025
подпись, дата

А.А. Кобцев
(раздел 2)

Стажер-исследователь


30.12.2025
подпись, дата

Н.А. Титченко
(раздел 4)

Стажер-исследователь


30.12.2025
подпись, дата

Д.Р. Халиуллина
(раздел 3)

Гл. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


30.12.2025
подпись, дата

С.В. Акулиничев
(введение, раздел 5)

Науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


30.12.2025
подпись, дата

И.А. Яковлев
(раздел 6)

Науч. сотр.


30.12.2025
подпись, дата

Ю.К. Гаврилов
(введение, раздел 5, 7)

Мл. науч. сотр.


30.12.2025
подпись, дата

Б.В. Мартынова
(раздел 7)

Стажер-
исследователь

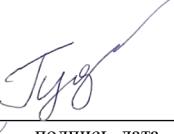
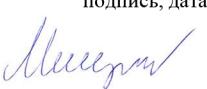

30.12.2025
подпись, дата

Г.В. Мерзликин
(раздел 5, 7)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


30.12.2025
подпись, дата

С.Г. Лебедев
(введение, раздел 8, 9, заключение)

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	С.А. Гудошников (введение, раздел 8)
Научный сотрудник		30.12.2025	А.А. Алексеев (раздел 9)
Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	А.А. Каспаров (введение, раздел 10)
Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	М.Н. Лифанов (раздел 10)
Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	В.М. Скоркин (раздел 11)
Инженер		30.12.2025	В.В. Мицук (раздел 11)
Вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	С.Ф. Сидоркин (раздел 12)
Заместитель заведующего БНО ИЯИ РАН по научной работе, канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	А.М. Гангапшев (введение, раздел 13)
Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	И.Н. Сергеев (введение, раздел 13)
Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	З.А. Ахматов (введение, раздел 13)
Мл. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	Д.А. Текуева (раздел 13)
Ст. инж.-эксп.		30.12.2025	А.И. Гежаев (раздел 13, 14)
Гл. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук		30.12.2025	Л.Б. Безруков (введение, раздел 15, 16, 18)
Вед. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук		30.12.2025	В.В. Синев (введение, раздел 15, 16, 18)
Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	Н.Ю. Агафонова (введение, раздел 16)
Науч. сотр., канд. физ.-мат. наук		30.12.2025	Е.А. Добрынина (раздел 16)
Науч. сотр.		30.12.2025	Р.И. Еникеев (раздел 16)

Вед. инженер

30.12.2025

подпись, дата

С.В. Ингерман

(раздел 16)

Ст. инженер.

30.12.2025

подпись, дата

Б.М. Колесников

(раздел 16)

Науч. сотр.,

канд. тех. наук

30.12.2025

подпись, дата

А.К. Межох

(раздел 16)

Гл. науч. сотр.,

д-р. физ.-мат. наук

30.12.2025

подпись, дата

В.В. Кузьминов

(введение, раздел 14)

Ст. науч. сотр.,

рук. ЛНФИ,

к.ф.-м.н.

30.12.2025

подпись, дата

Б.В. Казалов

(введение, раздел 17)

Мл. науч. сотр.

30.12.2025

подпись, дата

С.П. Якименко

(раздел 17)

Нормоконтроль

30.12.2025

подпись, дата

О.Н. Либанова

РЕФЕРАТ

Отчет 108 с., 1 кн., 43 рис., 9 табл., 57 источн., 1 прил.

ТАРГЕТНАЯ РАДИОНУКЛИДНАЯ ТЕРАПИЯ, АКТИНИЙ-225, ВИСМУТ-213, РАДИОНУКЛИДНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ, АКТИНИЙ-225/ВИСМУТ-213 ГЕНЕРАТОР, СТРОНЦИЙ-82/РУБИДИЙ-82 ГЕНЕРАТОР, НАТРИЙ-22, ФЛЭШ-ТЕРАПИЯ, ПРОТОННАЯ ТЕРАПИЯ, ПСЕВДОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, НАНОГРАФИТОВЫЕ ПЛЕНКИ, СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ, РАДИОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД, РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА, СРЕДСТВО ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ (СИЗ), ADS, БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ, ТРАНСМУТАЦИЯ МИНОРНЫХ АКТИНОИДОВ (МА), ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДЕТЕКТОР, СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СЧЕТЧИК ПОДЗЕМНЫЕ НИЗКОФОНОВЫЕ ЛАБОРАТОРИИ, ФОН ОТ РАДОНА И ДОЧЕРНИХ ПРОДУКТОВ, ИМПУЛЬСНАЯ ИОННАЯ ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА, НИЗКОФОНОВАЯ УСТАНОВКА ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ РАДОНА В ВОЗДУХЕ, ВЫХОД РАДОНА АЛЬФА-РАСПАД, СЦИНТИЛЛЯТОР, ТЕПЛОВЫЕ НЕЙТРОНЫ, АНТИНЕЙТРИНО, ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР, ОСКОЛКИ ДЕЛЕНИЯ, ПОДЗЕМНЫЕ ГАЗЫ, РАДОН, АЭРОИОНЫ

В отчете представлены результаты научных работ в 2025 году по широкому кругу междисциплинарных исследований, среди которых модернизация параметров генератора рубидия-82, получение натрия-22 и разработка на его основе источников радиоактивного излучения, разработка циркулирующего $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора для прямого синтеза меченых соединений, изучение экстракционных и хроматографических методов разделения изотопов Ti и Sc для разработки генераторных схем получения ^{44}Sc . Проведены подготовка и планирование конформного облучения биологических объектов в ходе радиобиологических исследований. Выполнено исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах, разработка перспективных методов детектирования нейтронов, комплексное испытание радиационно-защитных материалов, поиск вариаций потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории НЛГЗ-4900 в БНО ИЯИ РАН, измерены содержания радионуклидов в почве, воде и пр. объектах. В ИЯИ РАН разработаны автономные станции мониторинга окружающей среды. Высказаны предложения по определению места ADS в атомной энергетике. Антинейтринное излучение из ядерного реактора применено для диагностики процессов в активной зоне. План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты, которые были доложены на крупных конференциях и опубликованы в 2025 году в ведущих научных журналах.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	5
СОДЕРЖАНИЕ.....	6
ВВЕДЕНИЕ	9
1. Модернизация генератора рубидия-82 и изучение режимов его эксплуатации	15
1.1. Оценка зависимости производительности генератора рубидия-82 от содержания катионов щелочноземельных металлов	15
1.2. Влияние аскорбиновой кислоты на производительность генератора рубидия-82.	18
1.3. Научное и научно-техническое сотрудничество, в том числе международное	19
1.3.1. Международное сотрудничество	19
1.3.2. Внутрироссийское сотрудничество	19
1.3.3. Научный задел, имеющийся у коллектива, который может быть использован для достижения целей, предлагаемых к разработке научных тем или результаты предыдущего этапа.....	19
2. Получение натрия-22 с целью получения радиоактивных источников для научных исследований, промышленности и медицины.....	20
3. Разработка циркулирующего $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора для прямого синтеза меченых соединений	23
3.1. Определение константы устойчивости комплекса $[\text{BiDOTA}]^-$	23
3.2. Кинетика комплексообразования $[\text{BiDOTA}]^-$ в растворе.....	27
3.3. Получение меченого биоконьюгата ^{207}Bi -DOTA-Substance P	29
4. Изучение экстракционных и хроматографических методов разделения Ti(IV) и Sc(III) для разработки генераторных схем получения ^{44}Sc	32
4.1. Разделение Ti(IV) и Sc(III) методами жидкость-жидкостной экстракции	33
4.1.1. Выбор концентрации экстрагента.....	33
4.1.2. Многоступенчатое экстракционное разделения $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$	35
4.1.3. Стадия регенерации ^{44}Ti после многоступенчатого разделения $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$	38
4.1.4. Реэкстракция ^{44}Sc в раствор для последующего мечения.....	38
4.2. Разделение Ti(IV) и Sc(III) с использованием экстракционно-хроматографических смол	40
5. Подготовка и планирование конформного облучения биологических объектов в ходе радиобиологических исследований	43
5.1. Доработка системы пассивного формирования для облучения конформного облучения опухолей живых моделей в модифицированном пике Брэгга	43
5.2. Разработка нового коллиматора полного поглощения с оптимальными для облучения лабораторных животных параметрами	45
6. Оценка вклада нейтронной составляющей в дозу при протонной терапии.....	48
7. Облучение и анализ реакции биологических объектов	50

8.	Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах.....	52
9.	Разработка перспективных методов детектирования нейтронов и протонов.....	58
10.	Комплексные испытания радиационно-защитных материалов.....	61
10.1.	Безопасные испытания материала СИЗ ионизирующим излучением.....	61
10.2.	Испытание гамма-спектрометрического комплекса СКС-07П-Г41	62
10.3.	Имитация радиоактивного загрязнения для оценки дезактивируемости СИЗ ...	62
10.4.	XII Международная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях».....	62
11.	Определение элементного состава и структуры композитных материалов методами активационного анализа и резонансной флуоресценции на тормозном излучении электронного ускорителя ЛУЭ-8.....	64
11.1.	Радиометрическое детектирование излучений	64
11.2.	Спектрометрические измерения излучения изомеров	65
12.	Определение возможного места ADS в атомной энергетике в сравнении с быстрыми реакторами и гибридными термоядерными реакторами и трансмутация минорных актиноидов. Разработка каскадной подкритической сборки, с разделительной системой, обеспечивающей одностороннюю связь между двумя ее составляющими, которая может быть использована в энергетических ADS в условиях долговременной работы	68
13.	Измерение содержания радионуклидов природного и техногенного происхождения в почве, воде, растениях и пр. объектах	70
13.1.	Измерение содержания радионуклидов в образцах туфов и кирпичей	70
13.2.	Измерение содержания радионуклидов в образцах волос лошадей	70
13.3.	Измерение содержания радионуклидов в криоконитах Центрального Кавказа.	70
13.4.	Измерение содержания радионуклидов в сосновой хвое	71
13.5.	Обзор по биологическому воздействию высокоэнергичных мюонов	71
14.	Тестовый низкофоновый сцинтилляционный детектор для контроля содержания радона в воздухе.....	73
14.1.	Описание монитора радона с низкофоновым сцинтилляционным детектором .	73
14.2.	Измерение содержания радона в воздухе сцинтилляционным детектором	75
15.	Исследование взаимосвязи энерговыделения в теле Земли с климатом, а также с длительностью суток в рамках модели Богатая водородом Земля	78
16.	Разработка комплекса для удалённого мониторирования параметров среды в подземных лабораториях. Параметры: температура, влажность, давление, плотность углекислого газа, плотности положительно и отрицательно заряженных аэроионов, радона	
16.1.	81	
16.2.	83	
17.	Поиск вариаций потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории НЛГЗ-4900 в БНО ИЯИ РАН, связанных с солнечными и лунными приливными эффектами, метеорологическими условиями, сейсмической активностью в регионе.....	85

18. Использование антинейтринного излучения из ядерного реактора для диагностики процессов, протекающих в активной зоне. Исследование формы всех спектров антинейтрино делящихся изотопов, составляющих спектр ядерного реактора.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	91
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	99
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.	104

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Модернизация генератора рубидия-82 и изучение режимов его эксплуатации»

В Институте ядерных исследований РАН был создан генератор, производящий медицинский изотоп рубидий-82, который эффективно используется в диагностике заболеваний сердечно-сосудистой системы с помощью позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ). Поскольку данный генератор уже использовался и планируется в будущем к коммерческому использованию в качестве медицинского изделия в России, требуется тщательное изучение его рабочих режимов и возможных ограничений. Важно подробно исследовать химические процессы, происходящие при получении сорбента на основе гидратированного диоксида олова (ГДО), влияние возможных примесей (в частности, аскорбиновой кислоты) и ионов щелочных и щелочноземельных металлов на эффективность работы генератора и его безопасность, а также при реальном применении генератора в медицинской практике – в условиях длительного взаимодействия сорбента с физиологическим раствором (0,9% NaCl).

2. Задача «Получение натрия-22 с целью получения радиоактивных источников для научных исследований, промышленности и медицины»

Целью работы лаборатории в данном направлении послужила организация наработки радионуклида натрий-22, предназначенного для создания источников monoэнергетического гамма-излучения, востребованных в отечественной промышленности, а также в медицине и научных экспериментах. Необходимо изготовить и апробировать усовершенствованную алюминиевую мишень, обеспечивающую более эффективное получение изотопа натрий-22 при облучении пучком протонов с начальной энергией до 160 МэВ.

3. Задача «Разработка циркулирующего $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора для прямого синтеза меченых соединений»

Одним из наиболее перспективных радионуклидов для медицины считается висмут-213, который получают из родительского актиния-225. В Институте ядерных исследований РАН была создана двухколоночная генераторная установка «Afrabis» для пары $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$. В её конструкции циркулирующий по замкнутому контуру раствор позволяет пространственно разделить актиний-225 и висмут-213 за счёт их сорбции на различных колонках, каждая из которых наполнена определённым типом сорбента. В частности, в одной из колонок используется сшитый декстран Sephadex G 25 для фиксации ^{213}Bi .

В отчетный период необходимо исследовать связывание висмута с распространенным хелатором H₄DOTA в среде сшитого декстрана при различных условиях

элюирования, в том числе при нагревании колонки. Следующим этапом работы является исследование мечения конъюгата DOTA-Substance P для прямого получения лекарственного радиофармацевтического препарата (РФЛП) в среде сшитого декстрана. Данный РФЛП показал свою высокую эффективность для лечения различных видов глиомы.

4. Задача «Изучение экстракционных и хроматографических методов разделения Ti(IV) и Sc(III) для разработки генераторных схем получения ^{44}Sc »

Настоящее исследование направлено на совершенствование генераторной технологии с акцентом на долговременное использование ^{44}Ti . На первом этапе проводится сравнительный анализ эффективности разделения изотопов ^{44}Ti и ^{44}Sc методом жидкостной экстракции и хроматографии. Опробованы различные кислотные среды – растворы соляной и азотной кислот разных концентраций – с использованием широкоиспользуемых в радиохимии экстрагентов, таких как трибутилфосфат (ТБФ) и три-н-октилфосфиноксид (ТОФО). Полученные результаты сопоставляются с поведением данных изотопов на носителях, пропитанных теми же экстрагентами (в частности, смолами TBP resin и TK200 resin), чтобы определить наиболее эффективные схемы разделения и способы улучшения срока службы генераторной системы.

5. Задача «Подготовка и планирование конформного облучения биологических объектов в ходе радиобиологических исследований»

С точки зрения методики радиобиологических исследований при облучении живых моделей очень важна конформность – точное совмещение области максимальной дозы и опухоли. Целью исследований была отработка методов подбора и калибровки оборудования, а также оптимизации параметров пучка протонов для экспериментальной терапии лабораторных животных (крыс) с интрацеребральной злокачественной глиомой 101.8.

6. Задача «Оценка вклада нейтронной составляющей в дозу при протонной терапии»

Контроль дозы от нейтронного излучения при протонной терапии методом пассивного рассеяния протонов важен для обеспечения эффективности лучевой терапии и для безопасности пациента, персонала и окружающей среды. Рассмотрены 3 типа мишеней: модель дозиметрического водного фантома PTW MP-3P, модель малого водного фантома для облучения планшетов и чашек петри с образцами клеток в культуре, а также водный фантом, размеры которого соответствуют размерам лабораторных крыс, которых используют в радиобиологических экспериментах. Для оценки вклада нейтронов используется метод пересчёта флюенса нейтронов в эффективную дозу.

7. Задача «Облучение и анализ реакции биологических объектов»

В данной работе представлены результаты серии экспериментов по облучению клеточных культур на сильноточном линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН. В этих экспериментах облучались клетки аденокарциномы толстой кишки человека (HT-29) и нормальные мезенхимальные стволовые клетки (ADSC) жировой ткани человека – фибробласты. Анализ проводился с помощью флуоресцентной микроскопии. Полученные результаты являются существенным вкладом в понимание биологической природы флэш-эффекта.

8. Задача «Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах»

Целью работы является исследование обнаруженных ранее в нанографитовых (НГ) углеродных пленках линейчатой структуры уровней Ландау, которые были зарегистрированы с помощью оптического излучения фотодиодами в момент скачка электросопротивления. Наблюдение дает лестницу из 136 уровней Ландау при комнатной температуре. При этом учитывая, что каждый уровень Ландау увеличивает магнитное поле на 0,66 Тесла, получается беспрецедентно высокое общее магнитное поле 90 Тесла. А если учесть, что фотодиод выходит на уровень насыщения и экстраполировать ход графика до пересечения с осью ординат, то получается поле 380 Тесла. Однако, при исследовании литературы [1-2] обнаружилось, что подобные поля 300-400 Тесла на уровнях Ландау нашли в графене – монослойном графите.

9. Задача «Разработка перспективных методов детектирования нейтронов и протонов»

Особенность проточного газового радиохимического метода состоит в использовании свойства свободного выхода атомов инертных радиоактивных газов, образующихся в результате ядерных реакций, из кристаллической решетки некоторых твердых веществ. Образовавшийся в ампуле детектора инертный радиоактивный газ транспортируется газом-носителем в пропорциональный газовый счетчик проточного типа, где производится измерение скорости распадов ядер радиоактивного инертного газа. Результат работы по задаче – разработка нейтронного монитора для реактора ПИК.

10. Задача «Комплексные испытания радиационно-защитных материалов»

В настоящее время на российском предприятии ОАО «ПТС» (см. работу [3-4]) серийно выпускается третье поколение СИЗ типа «РЗК» (ТУ 8570-047-38996367-2004), которое введено в нормы снабжения сотрудников МЧС. Параметры радиационно-защитных свойств «РЗК» вошли в ГОСТ Р 53264-2019 (см. работу [5]). Сотрудничество ИЯИ РАН и ОАО «ПТС» продолжается, при этом признаётся лидирующее положение ИЯИ

РАН в разработке систем и методик контроля радиационно-защитных свойств композиционных материалов, используемых для изготовления спецодежды.

11. Задача «Определение элементного состава и структуры композитных материалов методами активационного анализа и резонансной флуоресценции на тормозном излучении электронного ускорителя ЛУЭ-8»

В исследованиях фотоядерных реакций при низкой энергии актуальным является экспериментальное изучение мультипольных возбуждений вблизи нуклонного порога фотоядерной реакции (см. работы [6-9]). Ряд экспериментов по измерению сечений возбуждения изомеров и изомерного отношения в реакциях неупругого рассеяния фотонов были выполнены на тормозном пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН (см. работы [10,11]). Для исследования возбуждения изомеров вблизи нуклонного порога на линейном ускорителе ЛУЭ-8-5 улучшены характеристики импульсного пучка электронов длительностью 3 мкс с энергетическим разрешением ~1% в интервале регулируемой энергии от 4 до 10 МэВ (см. работу [12]).

12. Задача «Определение возможного места ADS в атомной энергетике в сравнении с быстрыми реакторами и гибридными термоядерными реакторами и трансмутация минорных актиноидов. Разработка каскадной подкритической сборки, с разделительной системой, обеспечивающей одностороннюю связь между двумя ее составляющими, которая может быть использована в энергетических ADS в условиях долговременной работы»

Данная задача пересекается с задачами создания мощных источников нейтронов на основе сильноточных протонных ускорителей в плане разработки мишеней, а ADS является некой альтернативой быстрым реакторам.

13. Задача «Измерение содержания радионуклидов природного и техногенного происхождения в почве, воде, растениях и пр. объектах»

В рамках данной задачи выполняются измерения содержания (удельной активности) радионуклидов в различных образцах с помощью стинтилляционных и полупроводниковых детекторов, расположенных как в наземных, так и в низкофоновых подземных лабораториях.

14. Задача «Тестовый низкофоновый сцинтилляционный детектор для контроля содержания радона в воздухе»

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН была разработана цилиндрическая воздушная импульсная ионная ионизационная камера (ЦВИК) с пониженным уровнем микрофонного шума [13]. В лабораторных условиях ЦВИК имеет разрешение 1,7% для α -частиц с энергией 5,49 МэВ. С её помощью проведён ряд измерений

содержания ^{222}Rn в воздухе различных объектов БНО ИЯИ РАН. Результаты этой работы представлены в [13].

15. Задача «Исследование взаимосвязи энерговыделения в теле Земли с климатом, а также с длительностью суток в рамках модели Богатая водородом Земля»

Предшествующие исследования данных эксперимента Борексино показали, что введение нового источника гео-антинейтрино от распада изотопа ^{40}K позволяет лучше объяснить полученные данные. При этом определился поток этих гео-антинейтрино. Он оказался большим и равным потоку, который предсказывает модель Богатая водородом Земля. Поэтому актуально исследовать взаимосвязь энерговыделения в теле Земли с климатом, а также с длительностью суток в рамках этой модели Земли.

16. Задача «Разработка комплекса для удалённого мониторирования параметров среды в подземных лабораториях. Параметры: температура, влажность, давление, плотность углекислого газа, плотности положительно и отрицательно заряженных аэроионов, радона»

Выбросы подземных газов могут быть как следствием готовящихся землетрясений, так и изменений локальной влажности и давления [14]. Контроль параметров окружающей среды является важной экспериментальной задачей в подземных лабораториях [15], [16]. Большинство существующих приборов работают в режиме единичных измерений и имеют разные ограничения на условия использования и разные типы хранения данных.

В 2025 году в ИЯИ РАН разрабатываются автономные станции (комплексы) способные мониторировать параметры окружающей среды, такие как температуру, влажность, давление, концентрацию CO_2 , радона, плотность положительных и отрицательных аэроионов, измерять уровни вибрации в разных диапазонах частот.

17. Задача «Поиск вариаций потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории НЛГЗ-4900 в БНО ИЯИ РАН, связанных с солнечными и лунными приливными эффектами, метеорологическими условиями, сейсмической активностью в регионе»

В работе [17] в качестве ещё одного метода измерения вариаций концентрации радона в поверхностном слое грунта предложено регистрировать тепловые нейтроны, рождающиеся в (α, n) -реакциях на ядрах элементов, входящих в состав грунта, и частично выходящих в приземный слой воздуха. Также в этой работе показана корреляция между потоком тепловых нейтронов из грунта и приливными эффектами в земной коре. Там же показано повышение потока тепловых нейтронов из грунта в преддверие сейсмической активности вблизи места расположения детектора. Кроме того, поток нейтронов в подземных лабораториях является критическим фактором при оценке фона в

низкофоновых экспериментах, таких как эксперименты по поиску двойного бета распада, поиск темной материи и т. д.

18. Задача «Использование антинейтринного излучения из ядерного реактора для диагностики процессов, протекающих в активной зоне. Исследование формы всех спектров антинейтрино делящихся изотопов, составляющих спектр ядерного реактора»

В ИЯИ РАН была разработана методика, позволяющая осуществлять прямой перевод измеренного спектра в антинейтринный.

В эксперименте Double Chooz ближним детектором была набрана достаточно большая статистика нейтринных событий. Она сравнима со статистикой выполненного ранее Ровенского эксперимента, но отличается меньшим фоном и лучшим энергетическим разрешением. Это позволяет восстановить спектр антинейтрино в более широком энергетическом диапазоне, чем в Ровенском эксперименте.

На базе восстановленного спектра антинейтрино из измерений Double Chooz получены отдельные спектры делящихся изотопов. В ИЯИ РАН предложена методика расчета спектра антинейтрино с привязкой к экспериментальным спектрам. Такой подход позволяет улучшить знания о бета-переходах осколков далеких от линии бета-стабильности.

1. Модернизация генератора рубидия-82 и изучение режимов его эксплуатации

В рамках поставленной задачи было продолжено изучение влияния состава элюента (0,9% NaCl) на производительность и надежность при эксплуатации генераторов рубидия-82, а также определение ограничений по содержанию этих примесей для обеспечения максимальной производительности и надежности генераторов. Под производительностью генератора рубидия-82 понимается объем кондиционного элюата (медицинского радиофармпрепарата), полученного от одного генератора за все время его эксплуатации.

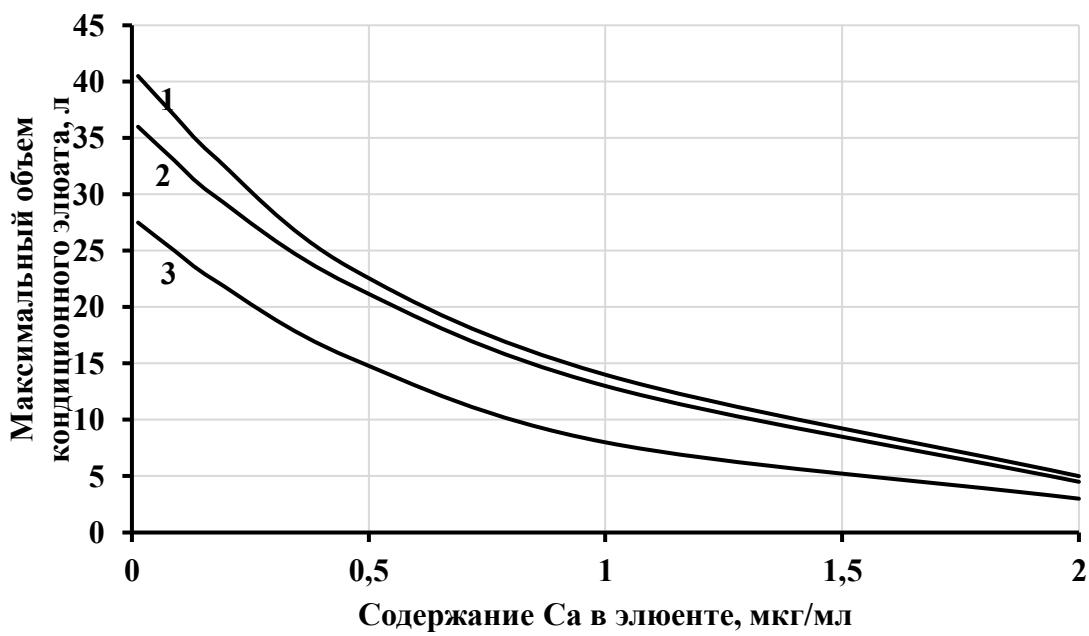
1.1. Оценка зависимости производительности генератора рубидия-82 от содержания катионов щелочноземельных металлов

При использовании генератора в соответствии с техническими условиями на его изготовление и требованиями фармакопеи в РФ, элюентом служит раствор «хлорида натрия 0,9% для инфузии» (рН от 5,0 до 7,5) без дополнительных компонентов. Содержание примесей в элюентах, использовавшихся в данной работе, а также, для сравнения, некоторых других коммерческих образцов «натрия хлорид 0,9% раствор для инфузий» приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание щелочноземельных элементов в различных изотонических растворах (0,9% NaCl)

Марка, производитель	Содержание элемента, мкг/л			
	Mg	Ca	Sr	Ba
Раствор NaCl в обессоленной воде, данная работа	9	32	<0,3	<1,0
Sodium Chloride 0,9% w/v Intravenous Infusion BP (B. Brown Melsungen AG, Germany), данная работа	<3	8	<0,2	<0,3
Натрия хлорид буфус. «Растворитель для приготовления лекарственных форм для инъекций», RENEVAL, Новосибирск	–	<150	2,0	<0,9
«Растворитель для приготовления лекарственных форм», SOLOPHARM, СПб	–	<150	0,9	<0,9
«Для инъекций», SOLOPHARM, СПб	–	170	<4	<10
«Для инъекций», SOLOPHARM, г. Тверь	–	460	<4	<10
Раствор Рингера для инъекций	–	90000	–	–

На рисунке 1 приведено графическое изображения расчетных значений максимального объема кондиционного элюата из генератора со стандартной колонкой и активностью по стронцию-82 100 мКи при различном содержании Ca²⁺ в элюенте (0,9% NaCl).



Активность ^{82}Sr в генераторе 3,7 ГБк (100 мКи). Удельная активность ^{82}Sr : 1 – 270 ГБк/мг; 2 – 180 ГБк/мг; 3 – 90 ГБк/мг

Рисунок 1 – Расчетные значения максимального объема кондиционного элюата из генератора (стандартная колонка) при различном содержании Ca^{2+} в элюенте (0,9% NaCl)

Из таблицы 1 и рисунка 1 следует, что далеко не каждый коммерческий изотонический раствор приемлем для использования с генератором рубидия-82. Если для приготовления изотонического раствора (0,9% NaCl) использовать, например, фармацевтический хлорид натрия, производимый фирмой PanReac AppliChem ITW Reagents (Италия), содержащий щелочноземельные элементы (очевидно, в основном кальций) в количестве до 0,005%, то тогда содержание кальция в полученном изотоническом растворе будет 0,46 мкг/мл, и, как видно из рисунка 1, при удельной активности стронция-82 в растворе хлорида стронция-82 90 ГБк/мг можно получить из генератора более 17 л кондиционного раствора невозможно, а при более высокой удельной активности – не более 24 л кондиционного элюата. Если же применять раствор для инъекций с большим содержанием кальция, «проскок» стронция может происходить в самом начале эксплуатации генератора. Например, при использовании в качестве элюента растворов Рингера, в каждом литре которого содержится несколько десятков миллиграммов Ca^{2+} , невозможно получить даже 1 л кондиционного элюата, поскольку проскок стронция-82 и стронция-85 произойдет сразу после нескольких первых инъекций (всего 50-100 мл).

Зависимость, приведенная на рисунке 1, определена в предположении, что весь кальций из этого раствора будет поглощаться сорбентом. Вероятно, при высокой скорости подачи раствора 0,9% NaCl (от 10 до 100 мл/мин) кальций не так эффективно дезактивирует центры адсорбции, как в условиях зарядки генератора (раствор другого состава и подается

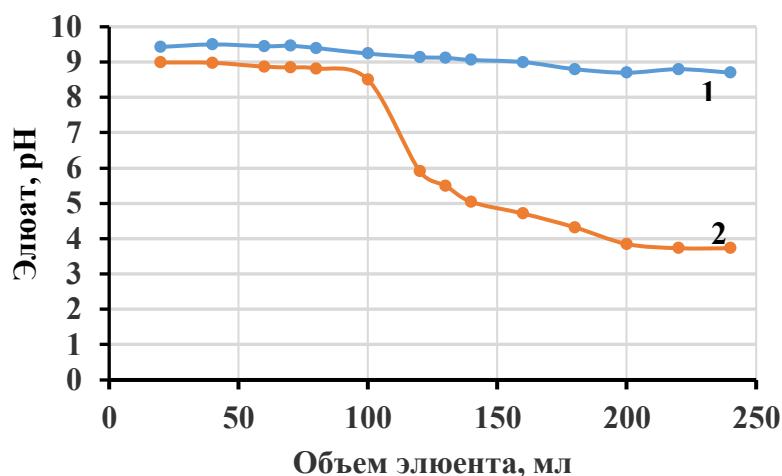
с гораздо меньшей скоростью – не более 1,5 мл/час). Кроме того, в растворе 0,9% NaCl содержание катионов натрия гораздо выше содержания катионов кальция, и дезактивированные центры адсорбции могут регенерироваться путем катионного обмена кальция на натрий. Поэтому возможно, что в результате будет приемлемо несколько большее содержание кальция в элюенте. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Производительность генератора зависит от качества сорбента в генераторной колонке, которое зависит от процессов катионного обмена, протекающих в результате элюирования различных растворов (элюентов) как при изготовлении сорбента, так и при эксплуатации генератора рубидия-82. В процессе приготовления сорбента через него проходит не менее 15 мкмоль Mg^{2+} , 33,5 мкмоль Ca^{2+} , 1,5 мкмоль Sr^{2+} и 5 мкмоль Ba^{2+} , а на стадии зарядки генератора (нанесение $^{82}Sr^{2+}$ на сорбент в генераторной колонке) с активностью по стронцию-82 100 мКи (3,7 ГБк) – от 75 мкмоль до 1100 мкмоль Mg^{2+} , от 480 мкмоль до 5100 мкмоль Ca^{2+} , от 45 мкмоль до 150 мкмоль Sr^{2+} и от 4 мкмоль до 6 мкмоль Ba^{2+} в зависимости от состава радиоактивного сырья – солянокислого раствора хлорида стронция-82. Очевидно, что наибольшее влияние происходит при элюировании солянокислого раствора $^{82}SrCl_2$ на стадии зарядки генератора. Это связано с тем, что процесс проводят в условиях, наиболее благоприятных для сорбции катионов щелочноземельных элементов, чем при эксплуатации генератора (тестирование и клиническое применение). Кроме того, содержание катионов щелочноземельных металлов в растворе, как это следует из вышеприведенных данных, при зарядке генератора на три порядка больше, чем в элюенте.

Для оценки суммарного влияния неактивных катионов металлов на производительность генератора рубидия-82 была оценена относительная селективность катионного обмена щелочных и щелочноземельных элементов, входящих в состав раствора хлорида стронция-82 в качестве неактивных примесей. Селективность к катионам оценивалась в экспериментах в статических условиях по изменению рН жидкой фазы за время контакта, сопоставимое с временем контакта элюента с сорбентом в режиме клинического применения генератора рубидия-82. Было установлено, что катионы щелочноземельных металлов вступают в катионный обмен гораздо энергичнее, чем катионы щелочных металлов. Поэтому влияние катионов щелочных металлов не учитывалось. Было установлено, что среди катионов щелочноземельных металлов селективность возрастает в ряду $Ca < Mg < Sr < Ba$ (1:8:10:15).

1.2. Влияние аскорбиновой кислоты на производительность генератора рубидия-82

На рисунке 2 представлены графики, иллюстрирующие влияние двух слабокислых элюентов с одинаковым pH на pH элюата. График 1 представляет собой результат тестирования качества сорбента и указывает на то, что сорбент высокого качества и подготовлен к нанесению на него радиоизотопов стронция-82 (финальная стадия изготовления генератора рубидия-82). График 2 иллюстрирует процесс «отравления» сорбента в результате контакта с слабокислым раствором аскорбиновой кислоты, что выражается в уменьшении pH элюата с 9 до pH элюента (~3,7), что указывает на ухудшение качества сорбента. При элюировании раствором аскорбиновой кислоты сорбент окрашивается в светло-коричневый цвет в то время, как при элюировании раствора соляной кислоты цвет сорбента не меняется. Вся масса сорбента в колонке изменяет цвет после элюирования около 120-150 мл раствора аскорбиновой кислоты. Это означает, что генератор рубидия-82 со стандартной колонкой станет полностью неработоспособным при прохождении (элюировании) менее 1 л элюента, имеющего в своём составе аскорбиновую кислоту. Образующаяся субстанция светло-коричневого цвета прочно удерживается на сорбенте и обладает специфическим фруктовым запахом. По-видимому, образующиеся соединения полностью изолируют поверхностный слой сорбента от жидкой фазы, препятствуя протеканию химических процессов, корректирующих pH поступающего в колонку элюента, т.е. происходит «отравление» сорбента, в результате которого сорбент перестает функционировать надлежащим образом. Поэтому использовать изотонические растворы, имеющие в своем составе аскорбиновую кислоту, недопустимо.



Объем колонки $0,2 \text{ см}^3$; масса сухого сорбента $0,67 \text{ г}$. 1 – элюент раствор HCl (pH 3,64);
2 – элюент раствор аскорбиновой кислоты ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$, pH 3,75)

Рисунок 2 – Зависимость pH элюата от объема элюента: сравнение влияния соляной и аскорбиновой кислот сорбент для генератора рубидия-82

1.3. Научное и научно-техническое сотрудничество, в том числе международное

1.3.1. Международное сотрудничество

Продолжается сотрудничество с NAOGEN-PHARMA (France). После заключения Договора о патентной кооперации (международный регистрационный номер PCT/RU2022/000176, дата международной регистрации (подачи) 25.05.2022 г.) и получения “Marketing authorization” на генератор рубидия-82 KALDENN, изготавливаемый согласно договору по лицензии ИЯИ РАН, с 2025 началась поставка во Франции, а с января 2026 г. начинается поставка генераторов рубидия-82 в другие страны.

1.3.2. Внутрироссийское сотрудничество

В России подобный генератор изготавливался и испытывался ранее в РНЦРХТ им. А.М. Гранова. В настоящее время это производство необходимо перенести в специализированную организацию. С целью подготовки к полномасштабному производству генераторов рубидия-82 и в связи с возникшими трудностями при приобретении комплектующих фитингов для изготовления корпуса колонок генератора рубидия-82 у фирмы Swagelok (США) проведены переговоры с фирмой ООО Кипарт (Россия, Санкт-Петербург) о приобретении в КНР аналогов продукции Swagelok (фитинги CIR-LOK) и проводится испытание этих деталей.

1.3.3. Научный задел, имеющийся у коллектива, который может быть использован для достижения целей, предлагаемых к разработке научных тем или результаты предыдущего этапа

Имеющийся научно-технологический задел позволяет при наличии соответствующих производственных мощностей и налаженной поставки необходимого сырья и комплектующих (фитингов) организовать массовое производство генераторов рубидия-82 в Российской Федерации в ближайшее время.

2. Получение натрия-22 с целью получения радиоактивных источников для научных исследований, промышленности и медицины

Натрий-22 (^{22}Na) – один из ключевых радионуклидов, имеющих большое значение в науке, промышленности и медицине. Это изотоп с дефицитом нейтронов, что делает его невозможным для массового производства в ядерных реакторах.

Натрий-22 обладает сравнительно длительным периодом полураспада (2,6 года), испускает позитроны и высокоэнергетичные гамма-лучи с энергией 1274,5 кэВ. Он также имеет высокое значение минимально значимой активности (МЗА), что делает его удобным для применения в фундаментальных исследованиях, калибровке ПЭТ и гамма-детекторов, а также для определения толщины, дефектов и неоднородностей в продуктах на предприятиях.

В России единственным местом, где можно нарабатывать натрий-22, является линейный ускоритель протонов ИЯИ РАН, оснащённый Стендом облучения изотопных мишеней. В 2024 году ИЯИ РАН заключил новый контракт (Договор № 3024-4 от 10 апреля 2024 года) с акционерным обществом «РИТВЕРЦ» для совместной работы и поставки натрия-22, полученного в алюминиевых мишенях, облучённых на ускорителе ИЯИ РАН. В 2025 году эти работы были продолжены.

В отчетном году была изготовлена сборка для оптимизации наработки натрия-22 на пучке протонов с исходной энергией около 160 МэВ, состоящая из 10 алюминиевых мишеней. Размеры изготовленных мишеней указаны в таблице 2. Изображение полученной сборки в держателе показано на рисунке 3. Мишени имеют разную толщину (от 4,4 до 0,9 мм), а рамка держателя позволяет благодаря предусмотренному расстоянию между мишенями (3,8-5,2 мм) достигнуть оптимального охлаждения каждой мишени при облучении максимальным током протонов на Стенде – 120-130 мкА.

Таблица 2 – Размеры и масса изготовленных алюминиевых мишеней для производства натрия-22

№	Номер	Масса, г	Длина, мм	Высота, мм	Толщина макс, мм	Толщина мин, мм
1	1	7,87	79,7	36,8	0,9	0,9
2	2-1	19,86	44,0	40,9	4,4	3,5
3	2-2	21,25	47,0	40,9	4,4	3,5
4	3-1	7,57	14,8	40,9	4,4	4,4
5	3-2	33,67	65,5	40,9	4,4	4,4
6	4-1	6,67	14,9	40,9	4,4	3,5
7	4-2	29,44	65,4	40,9	4,4	3,5
8	5-1	4,96	14,8	40,9	3,3	2,5
9	5-2	21,78	65,5	40,9	3,3	2,5
10	6	49,74	72,3	41,0	6,0	6,0

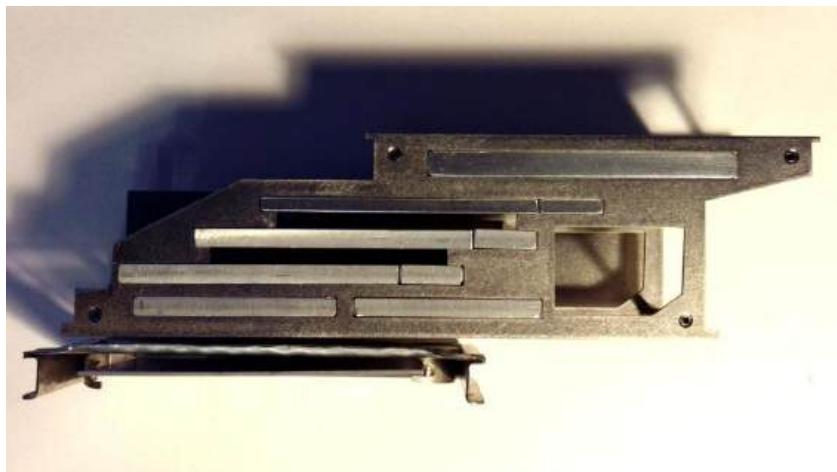


Рисунок 3 – Изготовленная из алюминия мишенная сборка в держателе

Можно видеть, что некоторые алюминиевые мишенные пластины составные. Это сделано для того, чтобы после облучения иметь возможность получить алюминий с более высокой удельной активностью и облегчить транспортировку в имеющихся контейнерах.

С помощью программного обеспечения MultiTa4 (ИЯИ РАН) были рассчитаны выходы образования натрия-22 в мишенях сборки. Для расчёта использовали начальную энергию пучка протонов 158,5 МэВ (соответствует параметрам Стенда ИЯИ РАН) (таблица 3). Можно видеть, что общий выход продукта составляет 0,02 мКи/мкА*ч.

В июне 2025 года по завершению работ по модернизации Стенда облучения изотопных мишеней на ускорителе ИЯИ РАН получено Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.01.16.000.М.002583.06.26, что позволило проводить работы по наработке радионуклидов. В октябре 2025 было проведено облучение данной алюминиевой сборки. Интеграл облучения составил 9303 мА*ч. Последняя колонка в таблице 3 показывает теоретический расчет образовавшегося натрия-22. Согласно расчетам, на момент

окончания облучения получено 150-180 мКи натрия-22, что полностью соответствует поставленной цели наработки продукта.

Таблица 3 – Теоретический расчет выхода натрия-22 при облучении сборки алюминиевых мишеней протонами с начальной энергией 158,5 МэВ на Стенде ИЯИ РАН

N	Вещество	Название	Толщина, см	Вход. энергия, МэВ	Сечение, мбарн	Выход, мКи/мкА*ч	Выход, мКи
1	Fe		0,01	158,5			
2	Li		0,2	157,837			
3	Fe		0,01	156,759			
4	Вода		3,2	156,092			
5	Алюминий	мишень-1	0,35	111,048	19	0,004628	43
6	Вода		0,38	98,068			
7	Алюминий	мишень-2	0,44	91,409	20	0,006138	57
8	Вода		0,48	71,813			
9	Алюминий	мишень-3	0,35	60,749	36	0,008591	80
10	Вода		0,48	37,794			
11	Алюминий	мишень-4	0,25	14,24	0	0	0
12	Вода		0,52	1			
13	Алюминий	заглушка	0,6	1			
14	Вода		0,3	1			
					Всего:		180 мКи

Также была произведена теоретическая оценка содержания примеси цинка-65. Цинк-65 (период полураспада 244 дн.) образуется при облучении алюминия протонами из содержащейся в сплаве меди по реакции $^{nat}\text{Cu}(\text{p},\text{x})^{65}\text{Zn}$. Сечение данной реакции составляет в указанных условиях от 2 до 5 мбарн. При максимальном содержании меди в алюминиевом сплаве 5 масс.% в результате облучения может образоваться не более 3 мКи цинка-65, что составляет около 1,5% от активности продукта натрия-22. Выделение и очистка натрия-22 производится в АО РИТВЕРЦ (С-Петербург) и примесь цинка можно отделить по известным методикам. Более эффективные методики развиваются с участием ИЯИ РАН.

3. Разработка циркулирующего $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора для прямого синтеза меченых соединений

В отчете за 2024 год ранее исследовали связывание висмута хелатором ДОТА ($2,2',2'',2'''-(1,4,7,10-$ -Тетраазациклогодекан-1,4,7,10-тетраил) тетрауксусная кислота) в среде смолы Sephadex G-25. Этот хелатор считается «золотым» стандартом для комплексообразования большого количества трех- и четырехвалентных металлов и широко используется в составе векторов доставки медицинских радионуклидов. ДОТА-содержащая биомолекула на основе синтетического пептида Substance P (рисунок 3) является вектором доставки ^{213}Bi и ^{225}Ac , перспективным для лечения опухолей головного мозга. В 2025 году продолжили работы в этом направлении.

3.1. Определение константы устойчивости комплекса $[\text{BiDOTA}]^-$

Определение термодинамических констант устойчивости комплексов металла с лигандом позволяет предположить возможность образования комплекса в исследуемой среде, а также оценить стабильность комплекса в биологических средах. Наиболее широко используемый метод для определения констант устойчивости комплексов – потенциометрическое титрование – имеет ряд ограничений, которые обязательно необходимо учитывать при проведении эксперимента. Одно из основных ограничений связано с рабочим диапазоном рН. Обычно потенциометрическое титрование проводят при значениях рН выше 2. Измеряемый потенциал связан с концентрацией протонов через уравнение Нернста:

$$E = E^0 + \frac{RT}{F} \ln ([H^+]) \quad (1)$$

где Е – измеряемая разность потенциалов, Е⁰ – стандартный потенциал электрода, R – универсальная газовая постоянная ($8,314 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), Т – абсолютная температура в Кельвинах, F – постоянная Фарадея ($96485 \text{ Кл}\cdot\text{моль}^{-1}$), [H⁺] – концентрация протонов.

В сильнокислых средах высокая концентрация ионов H⁺ затрудняет определение потенциала. В результате, если образование комплекса происходит в основном при значениях рН ниже 2, одного потенциометрического титрования для определения константы устойчивости может быть недостаточно, и требуются дополнительные методы. В противном случае значения определяемых констант устойчивости могут быть занижены, а протонированные формы комплекса могут не быть определены, как это было показано на примере комплекса $[\text{ScDOTA}]^-$ [18].

Другое ограничение возникает в случае легко гидролизующихся катионов, к которым относится и Bi³⁺, когда в процессе титрования может произойти осаждение. Чтобы предотвратить это, можно вводить добавки (например, хлорид-ионы), чтобы удерживать

висмут в растворе, и это необходимо учитывать в расчетах. Более того, для точного расчета константы устойчивости комплекса с помощью метода потенциометрического титрования его образование должно происходить быстро. Комплексообразование висмута с H₄DOTA, напротив, протекает крайне медленно при комнатной температуре, что создает дополнительные трудности.

Нами была предложена более удобная методика для определения констант устойчивости, особенно в случаях медленного комплексообразования (как с H₄DOTA) и легко гидролизующихся катионов – определение константы устойчивости методом конкурентных реакций с использованием сорбента Sephadex G-25. Сорбция на Sephadex G-25 может проводиться при низком pH, что позволяет более точно определять константы устойчивости в тех случаях, когда комплекс образуется уже в кислой среде.

Для определения константы устойчивости комплекса [BiDOTA]⁻ использовали следующую методику: сорбцию ²⁰⁷Bi проводили в эпандорфах объемом 1,5 мл с использованием 40 мг Sephadex G-25, замоченным предварительно в 500 мкл 0,15M NaCl. К сорбенту добавляли 40 мкл раствора ²⁰⁷Bi в 1 М HCl, раствора стабильного Bi³⁺ до конечной концентрации висмута 10⁻⁷ М, 40 мкл 1 М NaOH и 40 мкл ацетатного буфера с концентрацией 0,15M (pH 5,0–5,5). Общий объем доводили до 1 мл 0,15M NaCl. Эпандорфы помещали на шейкер на 3 часа для достижения равновесного состояния при сорбции. После сорбции отбирали 700 мкл для измерения на гамма-спектрометре. Десорбцию проводили при 90°C в течение 24 часов в 0,1M KNO₃, подкисленном HClO₄ до pH 2,0. Перед началом десорбции сорбент дважды промывали этим же раствором. Исследования десорбции проводили с использованием растворов H₄DOTA в диапазоне концентраций от 10⁻⁷ до 10⁻⁶ М. После десорбции отбирали 700 мкл раствора и измеряли на гамма-спектрометре для определения количества высвободившегося ²⁰⁷Bi.

Далее по результатам гамма-спектрометрии проводили расчет константы устойчивости комплекса [BiDOTA]⁻ с использованием представленных ниже формул.

Коэффициент распределения висмута между средами:

$$D = \frac{\sum [Bi]_{sorp}}{\sum [Bi]_{aq}} \quad (2)$$

Материальный баланс для висмута в растворе:

$$[Bi]_{aq} = [Bi^{3+}] + [Bi(OH)^{2+}] + [Bi(OH)_2^+] + [Bi(OH)_3] + [Bi(OH)_4^-] + [BiL] \quad (3)$$

Константы гидролиза описываются следующим выражением:

$$K_{Bi(OH)_n} = \frac{[Bi(OH)_n]}{[Bi^{3+}][OH]^n} \quad (4)$$

Подставляя данное выражение в материальный баланс, получаем:

$$[Bi]_{aq} = [Bi^{3+}] \left(1 + \sum_{n=1}^4 K_{Bi(OH)_n} [OH]^n \right) + [BiL_n] \quad (5)$$

Константы устойчивости комплекса:

$$\beta_{app} = \frac{[BiL_n]}{[Bi^{3+}][L]^n} \quad (6)$$

Объединяя выражения 5 и 6, получаем:

$$[Bi]_{aq} = [Bi^{3+}] \left(1 + \sum_{n=1}^4 K_{Bi(OH)_n} [OH]^n \right) + \beta_{app} [Bi^{3+}] [L]^n \quad (7)$$

Тогда формула коэффициента распределения приобретает вид:

$$D = \frac{[Bi]_{sorp}}{[Bi]_{aq}} = \frac{[Bi]_{sorp}}{[Bi^{3+}] \left(1 + \sum_{n=1}^4 K_{Bi(OH)_n} [OH]^n \right) + \beta_{app} [Bi^{3+}] [L]^n} \quad (8)$$

Общая концентрация лиганда:

$$c(L) = [L] \left([Bi^{3+}] \left(1 + \sum_{m=1}^4 K_{LH_m} [H]^m \right) + \beta_{app} [Bi^{3+}] \right) \quad (9)$$

Соотношение коэффициентов распределения (D_0 – коэффициент распределения свободного висмута, сорбция без добавления лиганда):

$$\frac{D_0}{D} = 1 + \frac{\beta_{app}}{\left(1 + \sum_{n=1}^4 K_{Bi(OH)_n} [OH]^n \right) \cdot \left(1 + \sum_{m=1}^4 K_{LH_m} [H]^m \right)} \cdot c(L)^n \quad (10)$$

Прологарифмировав уравнение 10, получим:

$$\begin{aligned} \lg \left(\frac{D_0}{D} - 1 \right) &= \\ n \cdot \lg (c(L)) + \lg \left(\frac{\beta_{app}}{\left(1 + \sum_{n=1}^4 K_{Bi(OH)_n} [OH]^n \right) \cdot \left(1 + \sum_{m=1}^4 K_{LH_m} [H]^m \right)} \right) & \end{aligned} \quad (11)$$

Угловой коэффициент из уравнения прямой, описывающей зависимость $\lg(D_0/D - 1)$ от $\lg C(H_4\text{DOTA})$, равен 1,085, что указывает на стехиометрию комплекса 1:1 (рисунок 4).

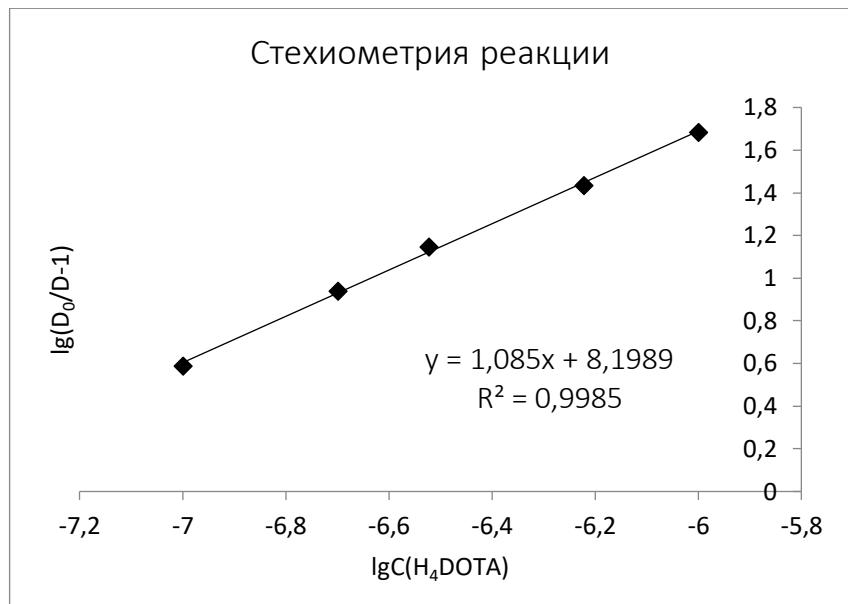


Рисунок 4 – Зависимость $\lg(D_0/D - 1)$ от $\lg C(H_4\text{DOTA})$

Чтобы ускорить достижение равновесия в системе, образцы нагревали до 90°C, поэтому в расчетах использовались константы протонирования H₄DOTA при 90°C в 0,1М NMe₄Cl [19]. Также были внесены поправки на присутствие ионов K⁺ в фоновом электролите с использованием множителя $\log(1 + \beta_{\text{KDOTA}}[K^+])$. По наклону зависимости D₀/D от c(L) (рисунок 5) была получена кажущаяся константа устойчивости $\log\beta_{\text{BiDOTA}} = 29,3 \pm 0,4$, что согласуется со значениями, приведенными в литературе (таблица 4).

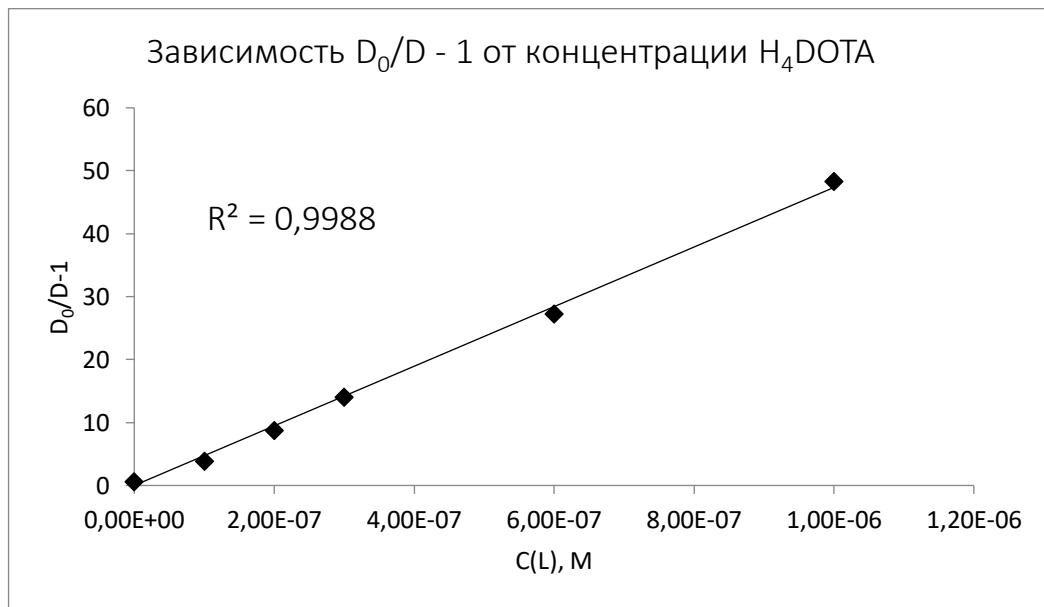


Рисунок 5 – Зависимость D_0/D от $C(H_4\text{DOTA})$

Таблица 4 – Значения логарифма констант устойчивости $[BiDOTA]^-$

	Спектрофотометрическое титрование [20]	Экстракция [21]	Сорбция (данная работа)
$Lg\beta$	30,3	$28,5 \pm 0,4$	$29,3 \pm 0,1$

3.2. Кинетика комплексообразования $[BiDOTA]^-$ в растворе

Кинетика комплексообразования висмута с лигандом H₄DOTA при комнатной температуре изучалась ранее, и было показано, что в этих условиях образование комплекса практически не происходит [22,23]. В нашей работе изучалась кинетика комплексообразования в диапазоне температур 60–90°C в условиях, соответствующих работе генератора ²²⁵Ac/²¹³Bi, по следующей методике: к 970 мкл раствора 10⁻⁵M H₄DOTA в 0,15M ацетатном буфере (pH 5,0–5,5) в эппendorфе на 1,5 мл добавляли 30 мкл раствора ²⁰⁷Bi в 1M HCl. Аликвоты 15 мкл отбирали через заранее установленные промежутки времени и анализировали методом тонкослойной хроматографии (ITLC), используя в качестве подвижной фазы смесь 0,15M NaCl + 0,003M NaOH. В данной системе свободные ионы Bi³⁺ остаются на старте ($R_f = 0$), в то время как комплекс [BiDOTA]⁻ движется с фронтом растворителя ($R_f \approx 1$) (рисунок 6, 7). ITLC-пластины визуализировали с помощью авторадиографии, а также измеряли на гамма-спектрометре.

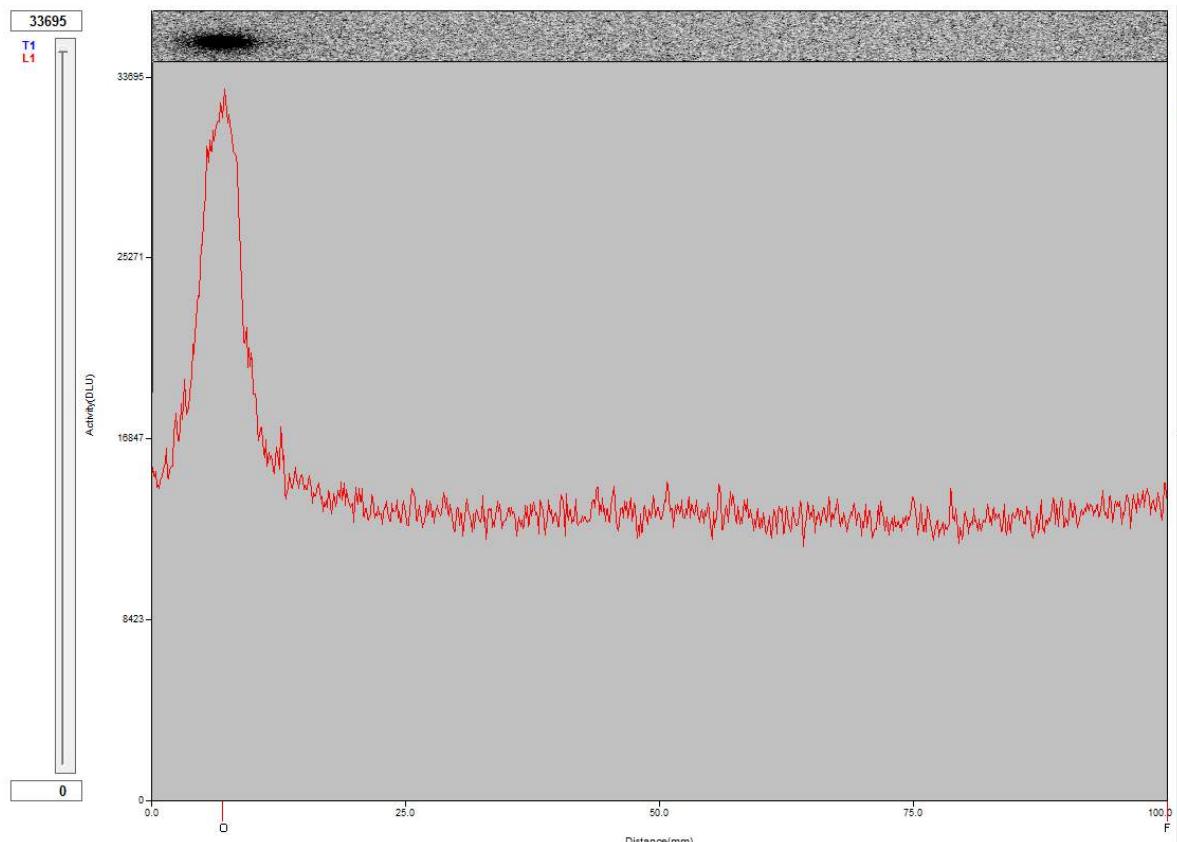


Рисунок 6 – Хроматографический профиль системы свободный висмут в элюенте 0,15M NaCl + 0,003M NaOH

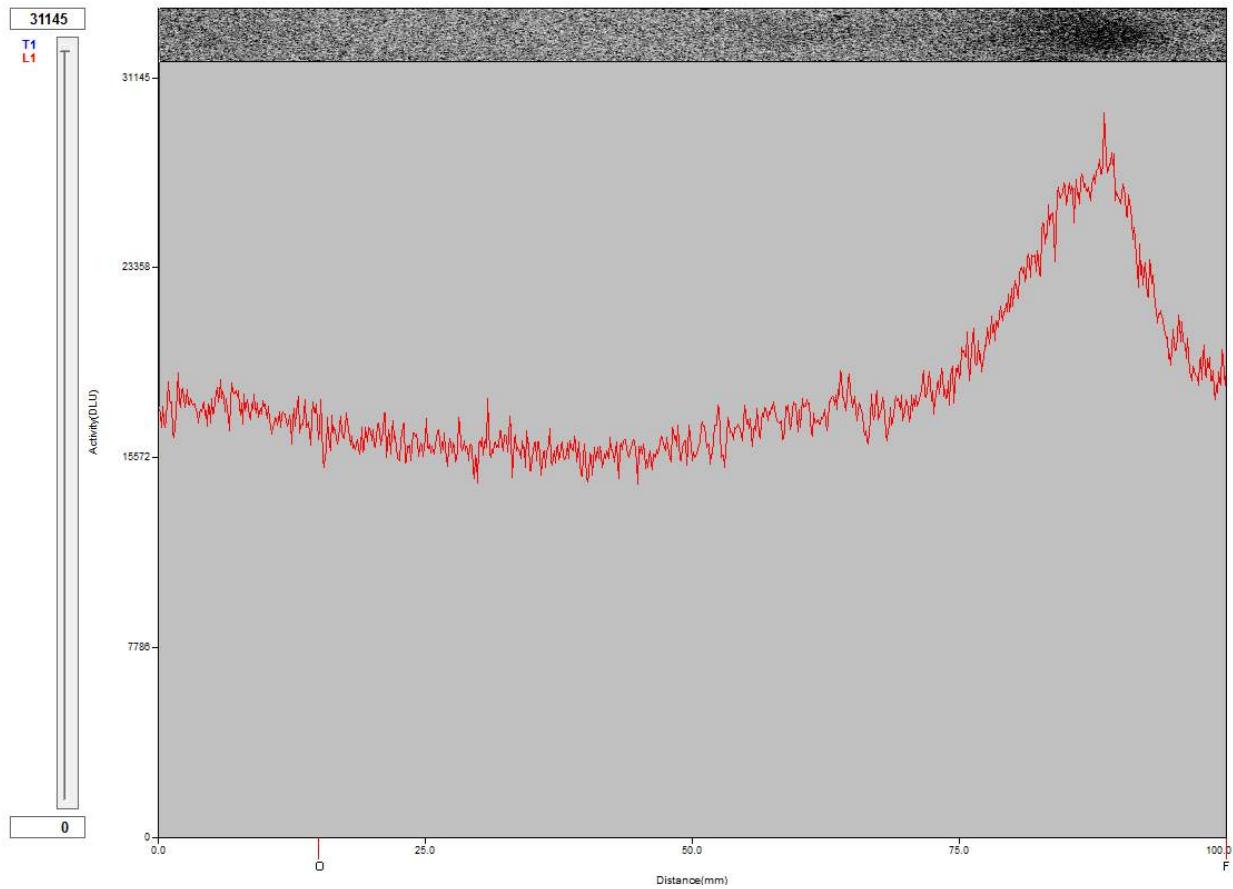


Рисунок 7 – Хроматографический профиль комплекса $[BiDOTA]^-$ в элюенте $0,15M\ NaCl + 0,003M\ NaOH$

Несмотря на то, что мечение биоконъюгатов пептидов обычно проводят при $90^\circ C$, изучение комплексообразования при более низких температурах крайне важно для термочувствительных молекул. Реакция комплексообразования $Bi^{3+} + DOTA^{4-} \rightarrow [BiDOTA]^-$ подчиняется кинетике псевдопервого порядка, поскольку концентрация лиганда значительно превышает концентрацию ионов Bi^{3+} и остается практически постоянной в течение всей реакции. Кинетика псевдопервого порядка описывается уравнением 12:

$$\ln \frac{C}{C_0} = kt \quad (12)$$

где k – константа скорости реакции (s^{-1}), t – время реакции (с), а C_0 и C – начальная и равновесная концентрации Bi^{3+} соответственно.

Начальная концентрация Bi^{3+} в растворе составляла $(8,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}\ M$. Экспериментальные данные показали, что при $90^\circ C$ комплекс $[BiDOTA]^-$ образуется в первые секунды (рисунок 8). При $70^\circ C$ реакция выходит на плато в течение 30 секунд, в то время как при $60^\circ C$ для достижения плато требуется приблизительно 50 секунд.

Зависимость степени связывания висмута с DOTA в растворе от времени

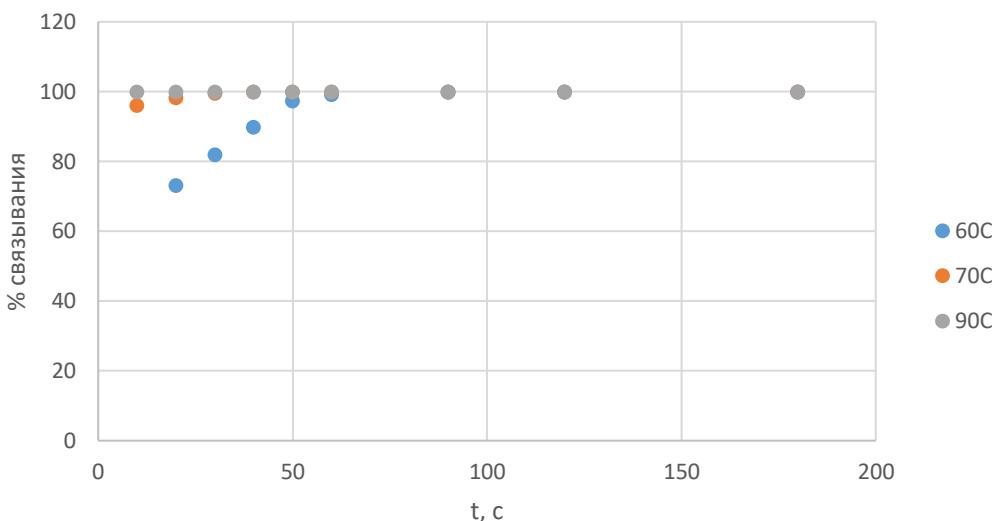


Рисунок 8 – Кинетика связывания висмута с H₄DOTA в 0,15М ацетатном буфере в растворе. Данные получены при обработке снимков ТСХ методом авторадиографии

Константы скорости реакции комплексообразования псевдопервого порядка были определены путем аппроксимации начальных линейных участков кинетических кривых: k_{набл} (60°C) = 0,0776 с⁻¹, k_{набл} (70°C) = 0,1669 с⁻¹.

С использованием полученных констант скоростей была определена энергия активации (E_a) процесса комплексообразования. Температурная зависимость константы скорости описывается уравнением Аррениуса:

$$\ln\left(\frac{k_1}{k_2}\right) = \frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right). \quad (13)$$

Таким образом, полученное значение энергии активации реакции комплексообразования висмута с H₄DOTA равно E_a = 72,7 кДж/моль.

3.3. Получение меченого биоконъюгата ²⁰⁷Bi-DOTA-Substance P

В отчете за 2024 год уже были представлены первые результаты по мечению биоконъюгата DOTA-Substance P изотопом ²⁰⁷Bi в статических условиях. Также изучали мечение биоконъюгата DOTA-Substance P изотопом ²⁰⁷Bi в динамических условиях на колонке. Данный эксперимент является моделированием десорбции висмута-213 с колонки генератора с одновременным получением радиофармацевтического препарата. На хроматографическую колонку нанесли 1 мл раствора DOTA-Substance P в 0,15М ацетатном буфере (pH 5,0-5,5) с концентрацией 143 мкг/мл. Элюирование проводили 0,15М ацетатным буфером. Концентрацию белка измеряли методом спектрофотометрии по линии 233 нм, после чего были построены кривые элюирования (рисунок 9). Для подтверждения связывания ²⁰⁷Bi с DOTA-Substance P провели следующий эксперимент: пропустили через

колонку 5 мл раствора с меткой ^{207}Bi , промыли ее изотоническим раствором и нанесли 1 мл раствора DOTA-Substance P в 0,15М ацетатном буфере (рН 5,0-5,5), а затем десорбировали полученный биоконьюгат 5 мл элюента. Кривые элюирования (рисунок 9) демонстрируют хорошее совпадение выхода активности висмута и пептида в собираемых пробах, что свидетельствует о синтезе радиоиммуноконьюгата. Максимальное количество выходит во втором мл, все смывается 4 мл. Получен препарат ^{207}Bi -DOTA-Substance P с РХЧ 92%, который сразу и очищается на сепадексе.

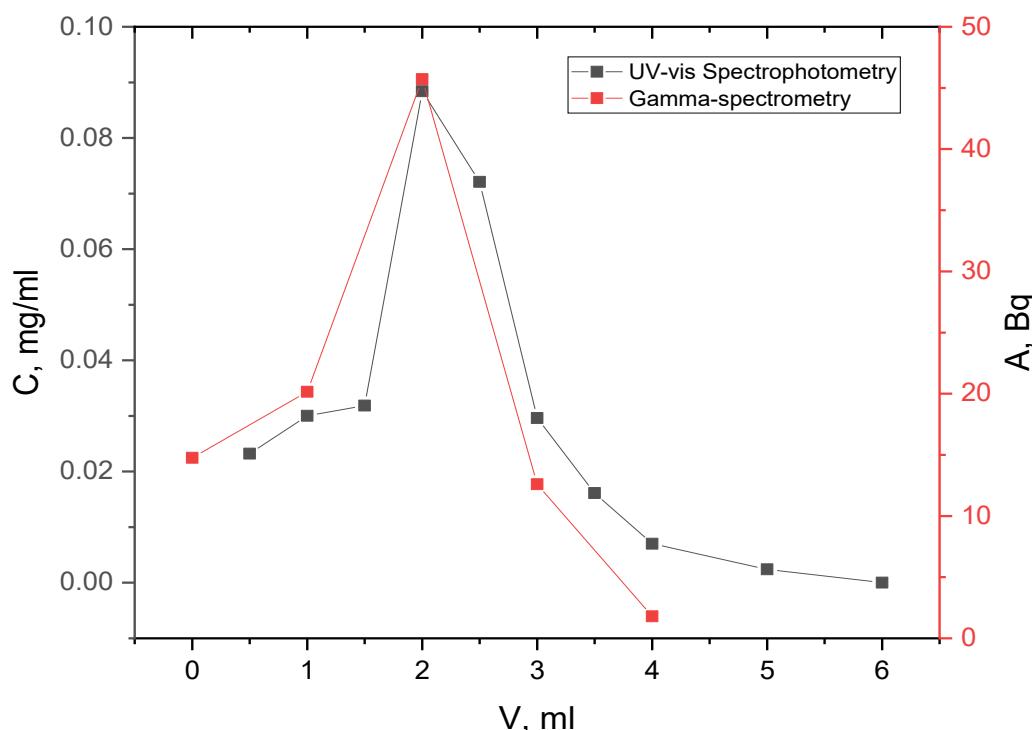


Рисунок 9 – Профили элюирования биоконьюгата DOTA-Substance P (спектрофотометрия) и меченого биоконьюгата ^{207}Bi -DOTA-Substance P (гамма-спектрометрия) с колонки, заполненной сорбентом Sephadex G-25

Кроме того, была исследована зависимость степени мечения биоконьюгата DOTA-Substance P от концентрации раствора пептида в диапазоне 15-50 мкг/мл в динамических условиях (рисунок 10). При увеличении концентрации пептида увеличивалось количество десорбируемого висмута в форме биоконьюгата. Количество связанного в биоконьюгат и свободного висмута контролировали посредством ТСХ. При концентрации пептида 50 мкг/мл выход радиоиммуноконьюгата составил $85 \pm 4\%$. Полученный продукт имел РХЧ $(98,0 \pm 2,5)\%$. Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными в статических условиях.

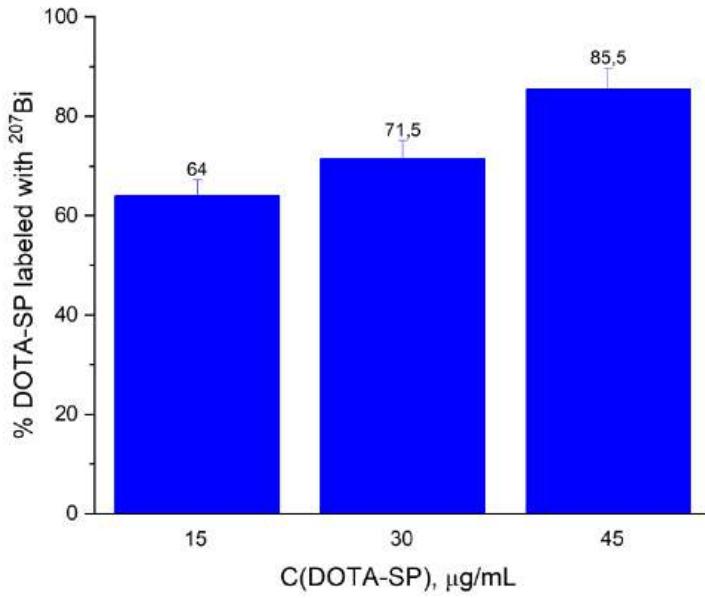


Рисунок 10 – Зависимость степени десорбции ^{207}Bi от концентрации DOTA-Substance P

4. Изучение экстракционных и хроматографических методов разделения Ti(IV) и Sc(III) для разработки генераторных схем получения ^{44}Sc

Радионуклид ^{44}Sc обладает высоким потенциалом для применения в ПЭТ диагностике за счёт выгодных ядернофизических характеристик ($T_{1/2} = 4$ ч, $E_{\text{avg}}^{\beta^+} = 632$ кэВ, 94%) и схожих химических свойств с рутинно применяемым ^{68}Ga ($T_{1/2} = 68$ мин. $E_{\text{avg}}^{\beta^+} = 836$ кэВ, 87,7%), благодаря чему ^{44}Sc может быть рассмотрен как аналог с большим периодом полураспада для препаратов на основе ^{68}Ga .

^{44}Sc может быть получен генераторным методом из материнского радионуклида из ^{44}Ti (60 лет). Долгий период полураспада материнского ^{44}Ti предполагает его многократное использование. Все представленные к настоящему времени в литературе генераторы $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$, относятся к генераторам прямого типа, т.е. предполагают сорбцию материнского радионуклида на сорбенте и периодическое элюирование дочернего, однако вопрос регенерации материнского ^{44}Ti остаётся нерешенным.

Для генераторных систем, в которых материнский радионуклид обладает длительным периодом полураспада целесообразно рассмотреть схемы обратного генератора, когда в момент разделения фиксируется дочерний радионуклид, и элюируется только после полной очистки от материнского. Такой подход позволяет сохранять материнский радионуклид в исходном растворе, что обеспечивает простоту регенерации системы, а также уменьшает радиационные воздействия на сорбент. Целью данной работы является разработка схем обратного генератора $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ с учетом возможности повторного использования ^{44}Ti .

В лаборатории радиоизотопного комплекса ИЯИ РАН совместно с кафедрой Радиохимии Химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в рамках договора о научном сотрудничестве проводится работа по исследованию экстракционных и хроматографических методов разделения Ti(IV) и Sc(III).

В отчёте за 2024 год представлены результаты исследования экстракции Ti(IV) и Sc(III) из растворов соляной и азотной кислот в органические фазы фосфорсодержащих экстрагентов: ди-(2-Этилгексил) фосфорной кислоты (Д-2-ЭГФК), трибутилfosфат (ТБФ), три-н-октилфосфиноксид (ТОФО), которые продемонстрировали обнадёживающие результаты с системами ТБФ – 7 М HCl, ТОФО – 3М HCl, ТОФО – 0,1М HNO₃.

В отчёмном году экспериментально уточнены концентрации экстрагентов для эффективного разделения Ti(IV) и Sc(III) в формате жидкость-жидкостной экстракции с использованием наиболее перспективных систем, а также проведены модельные

эксперименты по многоступенчатому экстракционному разделению $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$, подобраны условия для эффективной рэкстракции ^{44}Sc в водную фазу. Качество полученных растворов ^{44}Sc экспериментально подтверждено при мечении хелатора DOTA (1,4,7,10-тетраазациклогекан-1,4,7,10-тетрауксусная кислота).

Также проведены эксперименты по подбору условий разделения Ti(IV) и Sc(III) с коммерчески доступными экстракционно-хроматографическими смолами компании TrisKem, в которых используются изученных ранее экстрагенты TBP-resin (ТБФ), TK-200 resin (ТОФО).

4.1. Разделение Ti(IV) и Sc(III) методами жидкость-жидкостной экстракции

4.1.1. Выбор концентрации экстрагента

Для ТБФ и ТОФО была изучена зависимость D Sc(III) и Ti(IV) от концентрации экстрагента, которую варьировали в диапазонах 0,18–3,67 М и 0,01–0,18 М соответственно.

В каждую водную фазу вносили 0,2 кБк ^{44}Ti в равновесии с ^{44}Sc . Для экспериментов по экстракции ТБФ водной фазой служил 9 М раствор HCl. В случае ТОФО исследовались растворы 6,3 М HCl и 9 М HNO₃. Органические фазы готовили путем растворения экстрагентов Aliquat 336, Д-2-ЭГФК, ТОФО или ТБФ в толуоле до достижения необходимой концентрации раствора. Перед экстракцией органический раствор предварительно уравновешивали с раствором соответствующей водной фазы, не содержащей Ti(IV) и Sc(III). 500 мкл органической фазы добавляли в коническую пробирку типа Эппendorф объемом 1,5 мл к такому же объему добавленной водной фазы (соотношение фаз 1:1).

Пробирки встряхивали на шейкере со скоростью 3000 об/мин не менее 5 минут (Biosan V-32). После завершения перемешивания органическую и водную фазы разделяли центрифугированием в течение 10 секунд. После этого из обеих фаз отбирали аликовоты по 400 мкл для определения активности радионуклидов методом γ -спектроскопии.

Зависимость коэффициентов распределения D ионов Ti(IV) и Sc(III) от концентрации ТОФО и ТБФ в органической фазе была изучена при избыточной (относительно оптимальных для разделения Ti(IV) и Sc(III) условий) кислотности водной фазы для обеспечения достоверных результатов по экстракции Ti(IV). Информация о кажущейся стехиометрии комплексообразования ионов Ti(IV) и Sc(III) с молекулами ТОФО и ТБФ получена на основе анализа угла наклона в координатах $\log D - \log[\text{экстрагент}]$ (рисунок 11).

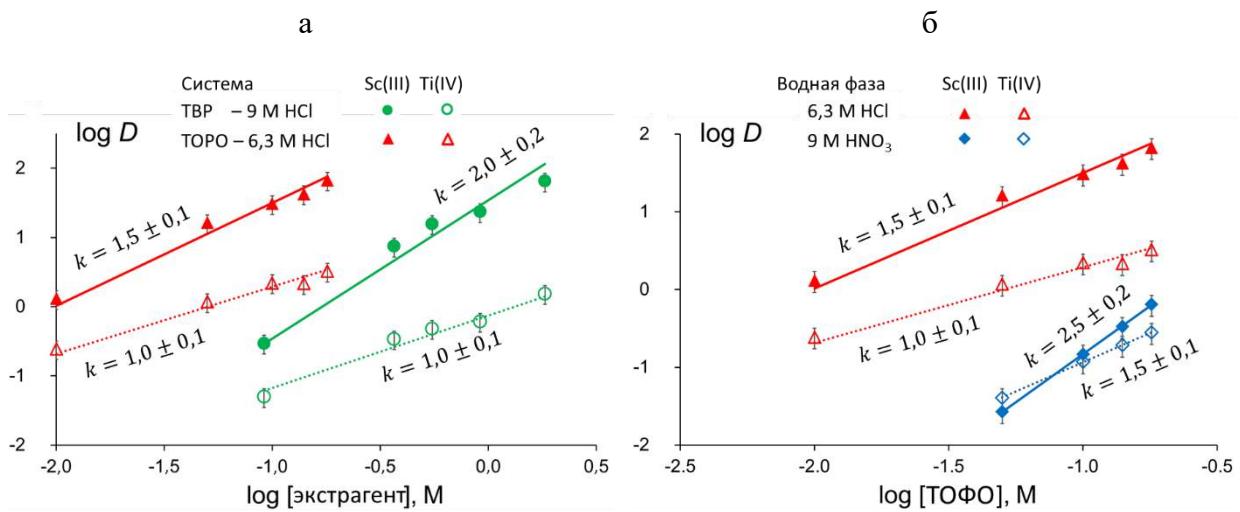


Рисунок 11 – Логарифмические зависимости D от концентрации экстрагента:
 а – распределение Ti(IV) и Sc(III) в экстракционных системах ТБФ – 9 М HCl и
 ТОФО – 6,3 М HCl; б – распределение Ti(IV) и Sc(III) в экстракционных системах
 ТОФО – 6,3 М HCl и ТОФО – 9 М HNO_3

При экстракции в ТОФО и ТБФ из солянокислых растворов (рисунок 11а) наблюдаются линейные зависимости с различными наклонами для Ti(IV) и Sc(III) . Значения коэффициентов угла наклона прямых для ионов Ti(IV) близки к 1, что говорит о том, что в данных условиях экстракция в органическую фазу происходит при взаимодействии Ti(IV) с экстрагентом в соотношении 1:1. Можно предположить образование комплексов состава $\text{TiOCl}_2 \cdot \text{Ex}$ (где Ex = ТОФО или ТБФ). Согласно данным [24], прямых для Ti(IV) в системе ТБФ – HCl варьируется от 1 до 3 в зависимости от концентрации титана, ТБФ и кислотности, что согласуется с результатами настоящей работы.

Наклоны прямых для Sc(III) составляют 1,5 и 2 для экстракции ТОФО и ТБФ соответственно, что говорит об образовании комплексов $\text{ScCl}_3 \cdot (1-2)$ ТОФО и $\text{ScCl}_3 \cdot 2\text{ТБФ}$. Учитывая линейные зависимости, полученные при экстракции ТОФО из 9 М растворов HNO_3 (рисунок 11а), было предположено, что ионы Ti(IV) образуют комплексы $\text{TiO}(\text{NO}_3)_2 \cdot (1-2)\text{ТОФО}$, в то время как комплексы ТОФО с ионами Sc(III) могут быть описаны как $\text{Sc}(\text{NO}_3)_3 \cdot (2-3)\text{ТОФО}$. Комплекс $\text{Sc}(\text{NO}_3)_3 \cdot 3\text{ТОФО}$ также был описан при экстракции Sc в ТОФО из 2 М раствора HNO_3 [25].

Поскольку в каждой из исследованных экстракционных систем сольватные числа больше для Sc(III) , чем для Ti(IV) , можно сделать вывод, что увеличение концентрации экстрагента улучшает разделение $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$. С учётом зависимостей степени экстракции Sc(III) от концентрации экстрагента из водных растворов с оптимальной для разделения концентрацией кислот (данные представлены в отчёте за 2024 год), выбраны оптимальные

концентрации экстрагентов 0,18 М ТОФО и 1,8 М ТБФ, где кривые степени извлечения Е для Sc(III) выходят на плато (рисунок 12).

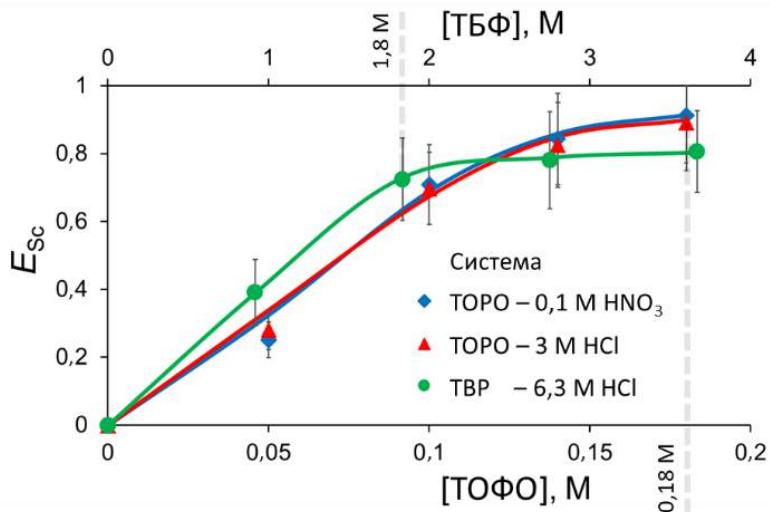


Рисунок 12 – Зависимость степени извлечения Е ^{44}Sc от концентрации ТОФО и ТБФ

Таким образом экстракционные системы 0,18 М ТОФО – 3 М HCl, 0,18 М ТОФО – 0,1 М HNO₃ и 1,8 М ТБФ – 7 М HCl признаны перспективными для дальнейшей разработки обратного генератора $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$.

4.1.2. Многоступенчатое экстракционное разделение $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$

Экстракционные системы 1,8 М ТБФ – 7 М HCl, 0,18 М ТОФО – 3 М HCl и 0,18 М ТОФО – 0,1 М HNO₃ были дополнительно исследованы в многостадийном экстракционном разделении ^{44}Sc и ^{44}Ti . В данных системах ионы Sc(III) в основном экстрагировались, в то время как ионы Ti(IV) оставались в водной фазе.

Для каждого этапа экстракции брали равные объемы водной и органической фаз по 2 мл. Исходный водный раствор с добавлением 1 кБк ^{44}Ti в равновесии с ^{44}Sc добавляли к соответствующему органическому раствору в полипропиленовом флаконе на 5 мл. Образец встряхивали и затем разделяли полученные органическую и водную фазы. Активность радионуклидов в органической A_{11}^O и водной фазах A_{11}^A измеряли методом γ -спектроскопии, и рассчитывали значение коэффициента экстракции E_{11} . Затем органическую и водную фазы приводили в контакт со свежей порцией водного и органического растворов соответственно (рисунок 13) и аналогичным образом получали два набора значений A_{12}^O , A_{12}^A , E_{12} и A_{21}^O , A_{21}^A , E_{21} .

Вертикальные и горизонтальные линии на схеме, представленной на рисунке 13, соответствуют стадиям и потокам. Для выбранных систем экстракции был изучен процесс разделения в прямоточном режиме, включающий два потока и четыре стадии (рисунок 13б).

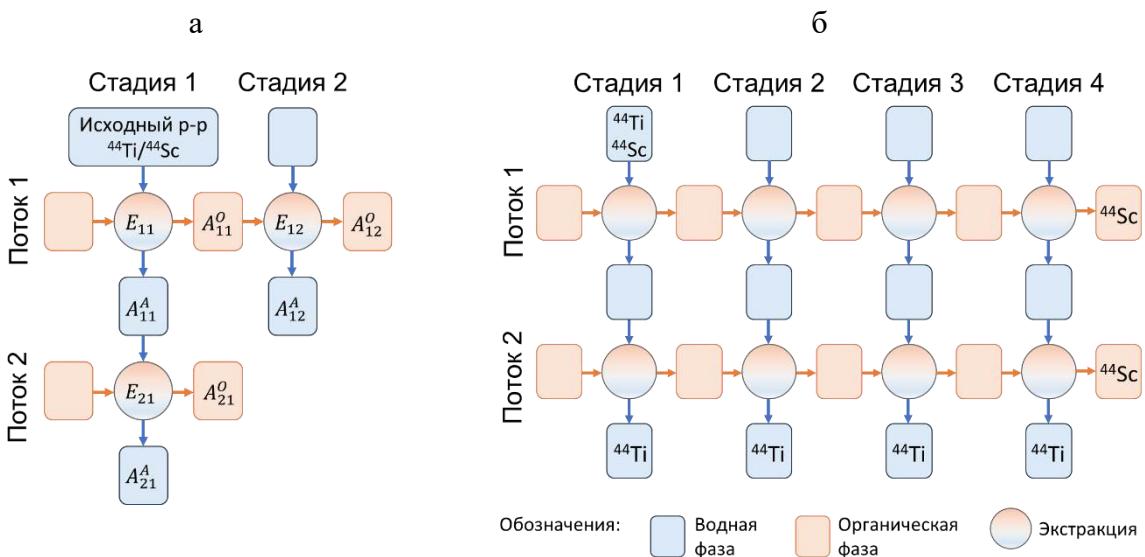


Рисунок 13 – Схема многоступенчатого разделения ^{44}Sc и ^{44}Ti : а – три начальные стадии экстракции; б – реализованная в работе схема разделения, включающая 2 потока по 4 стадии

Экспериментальные значения выхода ^{44}Sc и содержания примеси ^{44}Ti в органических фазах выбранных экстракционных систем представлены на рисунке 14.

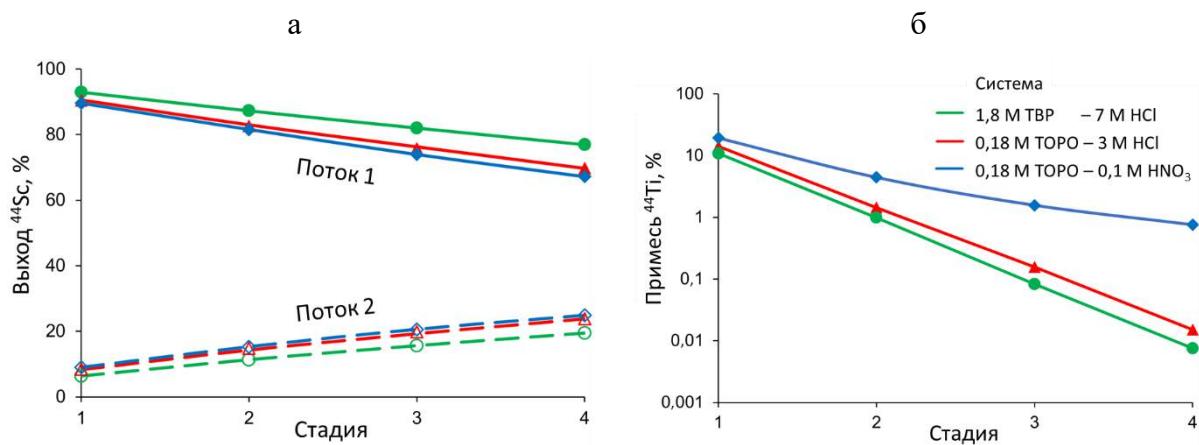


Рисунок 14 – Значения выходов ^{44}Sc в потоках 1 и 2 (а) и примесь ^{44}Ti (б) в зависимости от стадии многоступенчатого экстракционного разделения Ti(IV) и Sc(III)

Рисунок 14а демонстрирует, что ^{44}Sc , остающийся в водных фазах на каждой стадии из Потока 1, в основном извлекается в органическую фазу в Потоке 2. Очистка от ^{44}Ti (рисунок 14б) остается стабильной для экстракционных систем ТБФ – 7 М HCl и ТОФО – 3 М HCl, однако для системы ТОФО – 0,1 М HNO₃ очистка теряет эффективность от стадии к стадии. Другими словами, для двух первых систем значения D Ti(IV) не зависят от количества контактов фаз, тогда как для последней системы они экспоненциально растут, как можно видеть на рисунке 15. Тот факт, что все большая доля титана остается в органической фазе при увеличении количества стадий, можно объяснить медленной

кинетикой реэкстракции комплексов $\text{TiO}(\text{NO}_3)_2 \cdot n\text{TOFO}$ в разбавленную ($0,1 \text{ M HNO}_3$) водную фазу.

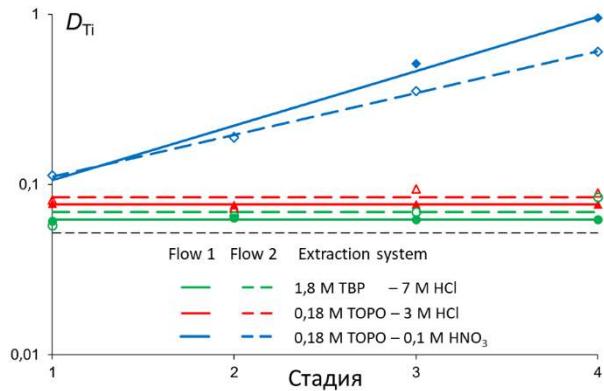


Рисунок 15 – Коэффициент распределения $D \text{ Ti(IV)}$ в зависимости от числа стадий

Результаты общего выхода и чистоты ^{44}Sc , полученные с помощью модельной многоступенчатой экстракции $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры растворов ^{44}Sc , полученные из моделирования многоступенчатого разделения $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$, включающего два потока и четыре стадии

Система	Выход ^{44}Sc , %	Примесь ^{44}Ti , %
ТБФ – 7 М HCl	96,4	$8,5 \cdot 10^{-3}$
ТОФО – 3 М HCl	93,6	$1,8 \cdot 10^{-2}$
ТОФО – 0,1 М HNO ₃	92,1	0,8

Системы на основе ТОФО и ТБФ, работающие в солянокислой среде, продемонстрировали значения выхода ^{44}Sc и содержания примеси ^{44}Ti после разделения по схеме «2 потока/4 стадии», которые превосходят хроматографические генераторы с сорбентом на основе гидроксамовой кислоты [26, 27].

Согласно экспериментальным результатам, представленным на рисунке 14, экстракционные системы ТБФ – 7 М HCl и ТОФО – 3 М HCl продемонстрировали постоянные соотношения $E_{\text{Sc}} = 0,90$ и $E_{\text{Ti}} = 0,08$. Предполагая, что значение коэффициента распределения D (и степень извлечения E) остаётся постоянным независимо от количества экстракций, долю извлекаемого вещества можно оценить для любого количества стадий и потоков. Расчёт, проводимый с учётом этих значений, демонстрирует что извлечение 95% ^{44}Sc , содержащего $6 \cdot 10^{-6} \%$ ^{44}Ti можно добиться после многоступенчатого разделения, включающего 7 стадий и 3 потока. Расчётный выход и чистота ^{44}Sc сопоставимы со значениями, соответствующими наиболее разработанным генераторам $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ на основе анионообменников с растворами щавелевой кислоты.

4.1.3. Стадия регенерации ^{44}Ti после многоступенчатого разделения $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$

Для регенерации ^{44}Ti из систем ТБФ – HCl и ТОФО – HCl водные фазы от стадий 1–3 (суммарно содержат $>99,9\%$ ^{44}Ti) объединяли и добавляли концентрированную соляную кислоту до конечной концентрации HCl 9 моль/л. Из полученного раствора дважды экстрагировали ^{44}Ti в органический раствор 0,18 М ТОФО, предварительно насыщенный с 9 М HCl, (ОФ:ВФ = 1:12 для регенерации из системы на основе ТБФ, и 1:24 для системы на основе ТОФО). Две органические фазы объединяли и трижды проводили реэкстракцию ^{44}Ti в 1 М HCl, (ОФ:ВФ = 4:1 для регенерации из системы на основе ТБФ, и 2:1 для системы на основе ТОФО). Соотношения фаз были подобраны таким образом, чтобы при добавлении 11 М HCl к регенерированному раствору ^{44}Ti в 1М HCl можно было достичь итоговой концентрации HCl 7 М и 3 М для систем на основе ТБФ и ТОФО соответственно. Потери ^{44}Ti на данном этапе не превышают 1% для системы ТБФ – 7 М HCl и 2% для ТОФО – 3 М HCl.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциале исследованных экстракционных систем для разработки эффективного генератора $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$. Сохранение ^{44}Ti в растворе соляной кислоты обеспечивает его химическую стабильность при длительном хранении и простую регенерацию для многократного использования.

4.1.4. Реэкстракция ^{44}Sc в раствор для последующего мечения

Реэкстракция ^{44}Sc была изучена для продемонстрировавших лучшие результаты разделения $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ экстракционных систем: 1,8 М ТБФ – 7 М HCl и 0,18 М ТОФО – 3 М HCl.

Полученный в соответствии с многоступенчатой процедурой разделения ^{44}Sc подвергали реэкстракции равным объемом деионизированной воды или буферных растворов NH₄OAc с концентрацией ацетат-ионов 0,5 М. Значения pH буферных растворов варьировались от 2,7 до 10. Разделенные фазы анализировали методом γ -спектроскопии, контролируя значения pH водных фаз после реэкстракции.

Поскольку значительное количество HCl так же экстрагируется в ТБФ и ТОФО [24], было исследовано изменение кислотности водной фазы за счет реэкстракции соляной кислоты из органической фазы, уравновешенной с кислотой. При реэкстракции в деионизированную воду значение pH водной фазы после контакта с органическим раствором из системы 1,8 М ТБФ – 7 М HCl было близко к нулю, тогда как для системы 0,18 М ТОФО – 3 М HCl оно составляло 1,2. Этот факт можно объяснить тем, что раствор 1,8 М ТБФ содержит в десять раз большую концентрацию экстрагента, насыщенного кислотой, чем раствор 0,18 М ТОФО. Следовательно, при реэкстракции ^{44}Sc из раствора ТБФ в водную фазу переносится значительно больше кислоты, чем из раствора ТОФО.

Поскольку мечение различных соединений ^{44}Sc обычно проводят в среде 0,25 М – 0,5 М ацетатного буфера с pH 4 – 5 [28], для реэкстракции использовали 0,5 М буферные растворы уксусной кислоты. К буферным растворам также добавляли определённое количество амиака с целью нейтрализации соэкстрагируемой кислоты и создания благоприятного pH-диапазона для последующего мечения ^{44}Sc . Результаты реэкстракции ^{44}Sc в ацетатные буферные растворы представлены на рисунке 16.

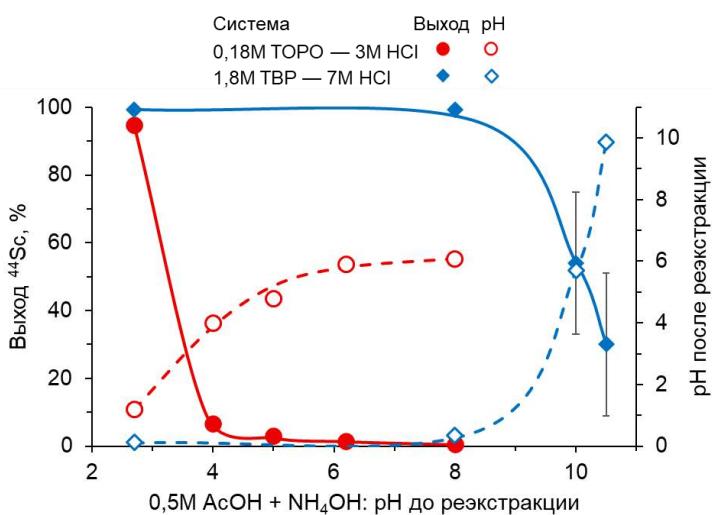


Рисунок 16 – Выход ^{44}Sc и pH водной фазы после реэкстракции в зависимости от pH исходного раствора ацетатного буфера

Выход ^{44}Sc до 100% наблюдался при реэкстракции как в 0,5 М уксусную кислоту, так и в воду (таблица 6), при условии, что значение pH водной фазы после реэкстракции было ниже 2. Избыточное добавление NH_4OH в буферный раствор перед реэкстракцией привело к резкому снижению выхода ^{44}Sc . На основании этих данных можно предположить, что основной движущей силой реэкстракции ^{44}Sc является перераспределение HCl между органической и водной фазами. Нейтрализация HCl NH_4OH приводит к снижению скорости переноса кислоты в водную фазу и гидролизу Sc(III), что может предотвратить его реэкстракцию.

Результаты реэкстракции ^{44}Sc в деионизированную воду и полученная кислотность водной фазы представлены в таблице 6 вместе с конечными значениями выхода ^{44}Sc и содержания примеси ^{44}Ti . Учитывая последующее использование раствора ^{44}Sc для мечения, разумным путем будет обратная экстракция в воду с последующей нейтрализацией кислоты и добавлением буферного раствора.

Таблица 6 – Выход ^{44}Sc на стадии реэкстракции и конечные параметры растворов ^{44}Sc , полученных после многоступенчатой экстракции «2 потока/4 стадии» и реэкстракции в деионизированную воду

Система	Реэкстракция ^{44}Sc в H_2O : Выход, %	Параметры раствора после реэкстракции		
		HCl, M	Общий выход ^{44}Sc , %	Примесь ^{44}Ti , %
1,8 М ТБФ – 7 М HCl	99,7±0,2	0,8±0,2	96±1	(8,5±1,5)·10 ⁻³
0,18 М ТОФО – 3 М HCl	95±2	0,06±0,02	89±2	(1,8±0,3)·10 ⁻²

Предложенная схема экстракционного генератора $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ обеспечивает получение продукта ^{44}Sc в разбавленных растворах соляной кислоты, что позволяет в дальнейшем использовать различные буферные растворы и стратегии для синтеза соединений, меченых ^{44}Sc .

Качество ^{44}Sc , полученного методом жидкость-жидкостной экстракции из систем на основе ТОФО и ТБФ с соляной кислотой после реэкстракции, было проверено при мечении хелатора DOTA.

Раствор ^{44}Sc в разбавленной HCl, полученный после реэкстракции в рамках многоступенчатого разделения $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ с экстрагентами ТБФ и ТОФО, трижды промывали толуолом для удаления возможных органических примесей. Далее 500 мкл раствора ^{44}Sc смешивали с 500 мкл 0,5 М NH₄OAc для создания буферной среды. pH раствора доводили до 4, добавляя 3 М NaOH. Затем добавляли хелатор DOTA до конечной концентрации 10⁻⁴ М. Образцы нагревали при 90 °C в течение 15 минут. Радиохимическую чистоту ^{44}Sc -DOTA оценивали с помощью тонкослойной хроматографии (iTLC-SG (Agilent Technologies), элюент 0,04 М NH₄OAc (pH = 5): MeOH = 1:1, Rf (свободный ^{44}Sc) = 0, Rf (^{44}Sc -DOTA) = 0,9 [12]). Анализ хроматограмм проводили с помощью методов цифровой авторадиографии и гамма-спектрометрии.

Степень мечения ^{44}Sc -DOTA (0,25 М NH₄OAc, pH = 4, C DOTA = 10⁻⁴ М, 90 °C 15 мин.) составила 99±1% для каждой из исследованных экстракционных систем, что свидетельствует о пригодности полученного ^{44}Sc для радиофармацевтического применения.

4.2. Разделение Ti(IV) и Sc(III) с использованием экстракционно-хроматографических смол

Предложенная схема обратного генератора $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ потенциально может быть реализована как в режиме жидкость-жидкостной экстракции, так и в режиме экстракционной хроматографии с использованием коммерчески доступных смол ТБФ и TK200 (ТОФО). Зависимость коэффициентов распределения Kd для ионов Ti(IV) и Sc(III) от кислотности водной фазы была изучена для смол, в которых используются исследованные ранее экстрагенты (рисунок 17).

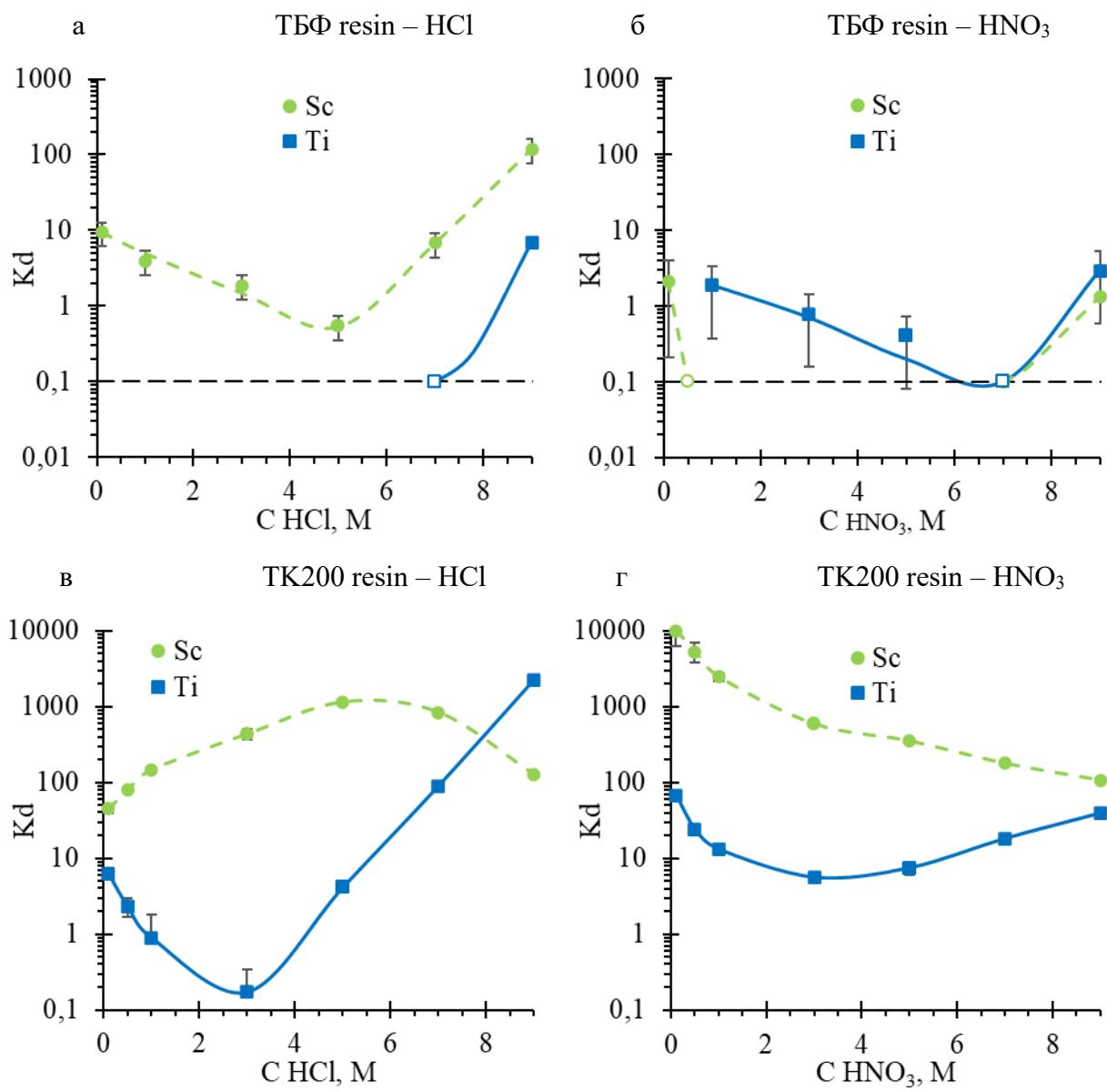


Рисунок 17 – Зависимость коэффициентов распределения Kd Ti(IV) и Sc(III) от концентрации соляной (а,в) и азотной (б,г) кислот на экстракционно-хроматографических смолах: ТБФ resin (ТБФ) (а,б) и TK200 (ТОФО) (в,г)

Полученные зависимости коэффициентов распределения Kd для экстракционно-хроматографических смол коррелируют с таковыми для соответствующих экстрагентов. Ti (IV) и Sc (III) слабо взаимодействуют со смолой ТБФ ($K_d < 10$) в растворах азотной кислоты. В случае соляной кислоты извлечение Ti (IV) и Sc (III) возрастает в области 7-9 М HCl, однако удержание Sc (III) не так высоко, как это наблюдалось в случае жидкость-жидкостной экстракции, где использовали органическую фазу с относительно высокой концентрацией экстрагента. Поэтому для разделения на ТБФ resin может понадобиться колонка большей длины. В случае смолы TK200 в области разбавленной азотной кислоты наблюдается значительное удержание Sc (III) с $K_d > 1000$, однако удержание Ti (IV) также довольно велико ($K_d > 10$), что не позволит провести эффективное разделение. Данный результат согласуется с многоступенчатым разделением $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ в системе 0,18 М ТОФО –

0,1 М HNO₃. Наибольшим потенциалом для разделения в формате экстракционной хроматографии обладает система TK200 – 3 М HCl.

5. Подготовка и планирование конформного облучения биологических объектов в ходе радиобиологических исследований

5.1. Доработка системы пассивного формирования для облучения конформного облучения опухолей живых моделей в модифицированном пике Брэгга

В рамках отчетного периода была подготовлена проведена серия экспериментов, посвященная облучению протонами различных биологических мишней: наборов пробирок-эндорфов и лабораторных планшетов, содержащих клеточные культуры, новообразований в области головного мозга - крыс (*Rattus norvegicus*) линии Wistar с подсаженной интракеребральной глиомой 101.8. Облучение живых моделей потребовало внесение конструктивных изменений в систему формирования распределений дозы, что связано со следующими особенностями поля, требуемого для облучения:

1. Облучение мишени, расположенной на малой глубине залегания, требует предварительного уменьшения диапазона энергий в спектре пучка. В отличии от пробирок, клеточных планшетов, а также сборок перепелиных яиц, которые можно погрузить на определенную глубину водного фантома, для облучения живых объектов, в системах пассивного формирования реализуется путем выставления набора пластин-поглотителей.

2. Уменьшение области радиационного воздействия до пучка с апертурой диаметром порядка 1-2 см.

С целью оптимизации параметров установки проведена серия последовательных симуляций направленных на подбор оптимальных параметров системы поглощения энергии коллимации пучка. Симуляции проводились при помощи ПО TOPAS MC, при этом использовались библиотеки сечений взаимодействий, соответствующие стандартному примеру Hadrontherapy пакета библиотек Geant4.

В результате моделирования получена конфигурация установки, позволившая провести облучение глиомы головы крыс. Схема установки представлена на рисунке 18.

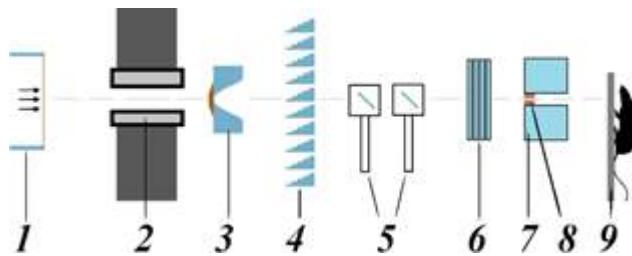


Рисунок 18 – схематическое изображение установки для облучения животных протонами в ИЯИ РАН с обозначением ключевых элементов: Тракт транспортировки пучка (ионопровод) 1. Коллиматор на входе в процедурный кабинет. 2. Вторичный рассеиватель пучка. 3. Гребенчатый фильтр для модификации дозного поля.4. Система детекторов черенковского излучения для контроля пучка. 5. Набор пластин-замедлителей для регулировки энергии протонов. 6. Защитный экран-коллиматор из орг.стекла. 7. Финальный коллиматор, изготовленный из меди.8. Деревянное крепление для позиционирования животного

Результатом симуляции стал расчет дозного поля в области (рисунок 19 a), захватывающей деревянное крепление, а также модель головы крысы представленную в виде системы концентрических сфeroидов вражения, заполненные материалом костной ткани и ткани головного мозга. Разбиение на воксели размеором $1\times1\times1$ мм позволяет провести оценку лучевой нагрузки на область головы крысы. На рисунке 19 b представлена тепловая карта распределения поглощенной дозы в плоскости, соответствующей центру модели головы. Рисунок 19 c представляет распределение дозы вдоль направления излучения, 19 c – в поперечном направлении на разных глубинах черепа с шагом 5 мм.

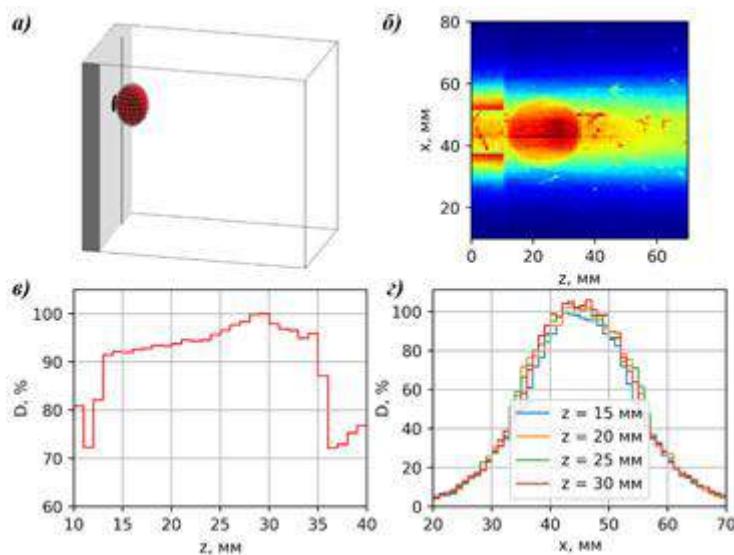


Рисунок 19 – а) Геометрия области вычисления поглощенной дозы. б) Тепловая карта распределения дозы в центральной плоскости пучка с осями XZ. в) Распределение дозы в центре пучка вдоль его оси. г) Поперечные распределения дозы в области макета головы животного на глубинах 15, 20, 25, 30 мм

Данные анализа продольного распределения дозы, представленные на рисунке 19 c , свидетельствуют о высокой однородности облучения вдоль оси пучка, где максимальное

отклонение не превышает 8%. Поперечные распределения дозы, зарегистрированные на различных глубинах (рисунок 19г), характеризуются высокой степенью симметрии. В пределах целевой области диаметром 1 см однородность дозы составляет не менее 90%, при этом ширина полутени достигает 1 см.

5.2. Разработка нового коллиматора полного поглощения с оптимальными для облучения лабораторных животных параметрами

Условно элементы пассивного формирования в протонной терапии можно разделить на два основных блока: коллиматоры, формирующие апертуру, и компенсаторы, модулирующие энергетический спектр. Коллиматоры обычно изготавливаются из материалов металлов, таких как латунь, медь, вольфрам, свинец, сплав Вуда. Такие изделия характеризуются меньшим фоновым рассеянием, тормозная способность при той же толщине значительно выше, чем для ПММА или полиэтилена. Для устройств модуляции, таких как гребенчатые фильтры, компенсаторы, болюсы, обычно используются лёгкие в механической обработке, предсказуемые по плотности и производящие меньшее количество вторичных нейтронов ПММА, акрил, полиэтилен, полиуретан и другие пластики. Таким образом, перед нами стояла задача реализовать в одном устройстве преимущества и коллиматора и компенсатора с целью полной остановки протонов за пределами облучаемой мишени.

В отчетном году проведено сравнение коллимирующих устройств, изготовленных из стандартных для данной задачи материалов, таких как медь, плексиглас и графит. Важно отметить, что для каждого коллиматора выбрана своя длина в соответствии с тормозной способностью данного материала. Поперечные размеры в плоскости, перпендикулярной оси распространения пучка, во всех случаях составили 10×10 см, что достаточно для полного экранирования лабораторного животного. Протяжённости различных рассмотренных коллиматоров приведены в таблице 7.

Таблица 7. Параметры коллиматоров из различных материалов

Материал	Толщина, мм
Медь	30
Графит	120
Плексиглас	160

Полученные по результатам симуляций методом Монте-Карло 10^8 первичных протонов с энергией 160 МэВ глубинные и поперечные дозовые распределения представлены на рисунке 20.

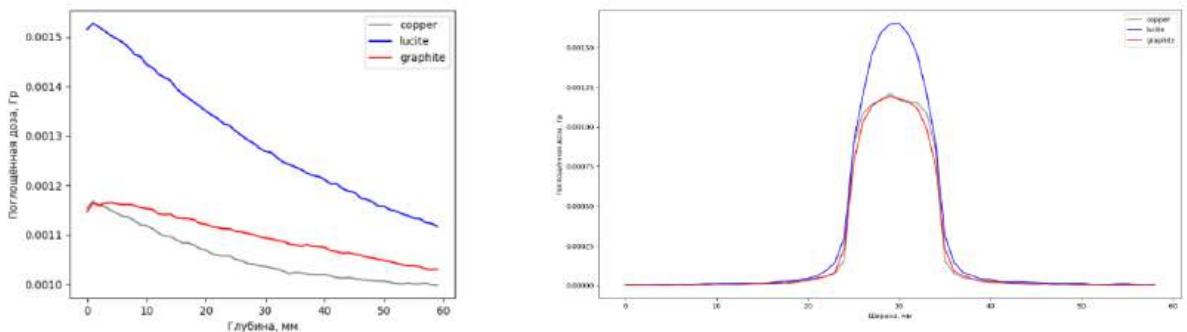


Рисунок 20 – Глубинные дозные распределения (слева), профили дозы на влёте пучка в фантоме (справа). Серая кривая – медный коллиматор, красная кривая – графитовый коллиматор, синяя кривая – коллиматор из плексигласа

Рисунок 20 иллюстрирует, что графитовый и медный коллиматор формируют более резкий спад дозы, а также существенно повышается однородность дозового распределения. Однако, поглощённая доза в мишени существенно выше для коллиматора из плексигласа, что хорошо отражает глубинное дозовое распределение. Также важным критерием оценки является продукция нейтронов при прохождении пучка протонов через массивный коллиматор. Данный критерий оценивался по методике, подробно описанной в предыдущем разделе отчёта. Результирующая эффективная биологическая доза нейтронного излучения, как и ожидалось, достигает самого низкого значения при использовании коллиматора из плексигласа, для графитового коллиматора поднимается относительно этого значения на 75%, а для медного и вовсе в 5 раз превышает значение. Таким образом, решалась задача реализации коллиматора полного поглощения, который будет обеспечивать резкий спад профиля дозы, минимизируя при этом вклад вторичных нейронов в дозу облучения и радиационную обстановку в процедурной КПТ. Для реализации задачи использовался комбинированный подход в изготовлении колирующего устройства: основная, поглощающая секция изготовлена из плексигласа толщиной 160 мм для полной остановки протонов в этой области, а окантовка центрального отверстия коллиматора, формирующего конечную апертуру, изготовлена из медной трубы с толщиной стенки 1 мм, чего достаточно для формирования чётких границ дозового профиля, сопоставимых с использованием исключительно медного коллиматора. Полученные в ходе моделирования результаты с комбинированным фильтром представлены на рисунке 21.

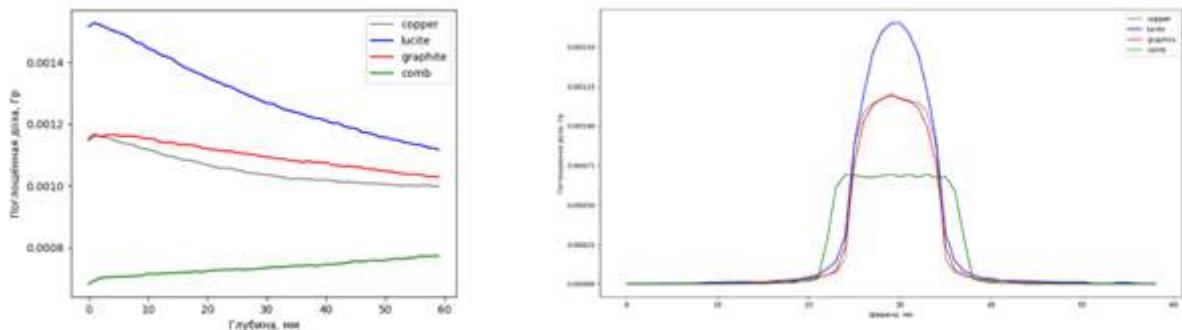


Рисунок 21 – Глубинные дозовые распределения (слева) и профили дозы на влёте пучка в фантоме (справа). Зелёная кривая – комбинированный коллиматор, остальные – как на рисунке 20

Как видно из этого рисунка, глубинные и поперечные дозовые профили с использованием комбинированного коллиматора обладают наибольшей однородностью относительно других рассмотренных конфигураций. Также биологически эффективная доза нейтронов в таком случае всего на 10% превышает дозу при использовании исключительно пластикового коллиматора, что в наших условиях не является существенным различием.

6. Оценка вклада нейтронной составляющей в дозу при протонной терапии

В протонной терапии эффективная доза вторичного нейтронного излучения обычно оценивается в единицах мЗв/Гр и определяет эффективную дозу нейтронного излучения в различных точках исследуемой области при подведении к мишени фиксированной дозы протонного излучения 1 Гр. В некоторых случаях величина эффективной дозы может быть определена экспериментально, однако практически не существует средств измерения, позволяющих детектировать нейтроны всего энергетического диапазона разом. В нашей работе для определения флюенса нейtronов с целью дальнейшей оценки эффективной биологической дозы в различных частях процедурной КПТ использовался программный пакет TOPAS MC [29], работающий на основе метода Монте-Карло.

Международный доклад ICRP 116 [30] содержит данные по коэффициентам пересчёта величин для радиационной защиты от внешнего облучения. Доклад содержит значения коэффициентов пересчёта флюенса частиц в эффективную дозу для фотонов, электронов, нейtronов и многих других частиц. Интерполированная на энергетический диапазон от 0 до 160 МэВ кривая зависимости коэффициента пересчёта от энергии представлена на рисунке 22.

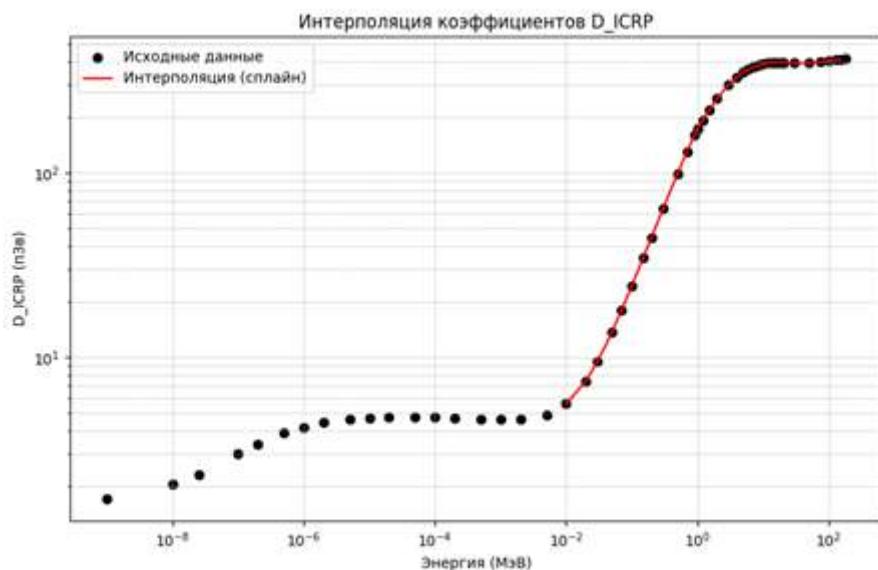


Рисунок 22 – Интерполированные коэффициенты пересчёта флюенса в эффективную дозу сплайнами в интервале от 10 кэВ до 150 МэВ

Для трёх типов экспериментально значимых геометрий, а именно: геометрии с дозиметрическим водным фантомом PTW MP-3P, геометрии с малым водным фантомом для облучения клеточных культур протонами в пике Брэгга и в области плато и геометрии для облучения небольшой мишени в голове лабораторного животного, обсуждённой

подробно в разделе 5.1 данного отчёта. Детектирующие пластины располагаются в непосредственной близости, а их размеры выбраны таким образом, чтобы целиком покрывать область возможного образования вторичных нейтронов от объектов системы детектирования и формирования пучка. В случае с дозиметрическим и малым фантомами это выход пучка из ионопровода, гребенчатый фильтр и неродственно сам фантом. В случае с фантомом крысы к рассмотрению добавляются пластины вблизи коллиматора и замедлителя. Также во всех случаях параллельно проводится расчёт поглощённой дозы с целью определения вклада нейтронов в пересчёте на 1 Гр поглощённой дозы. Получаемый в результате симуляции результат на примере случая с дозиметрическим водным фантомом представлен на рисунке 23.

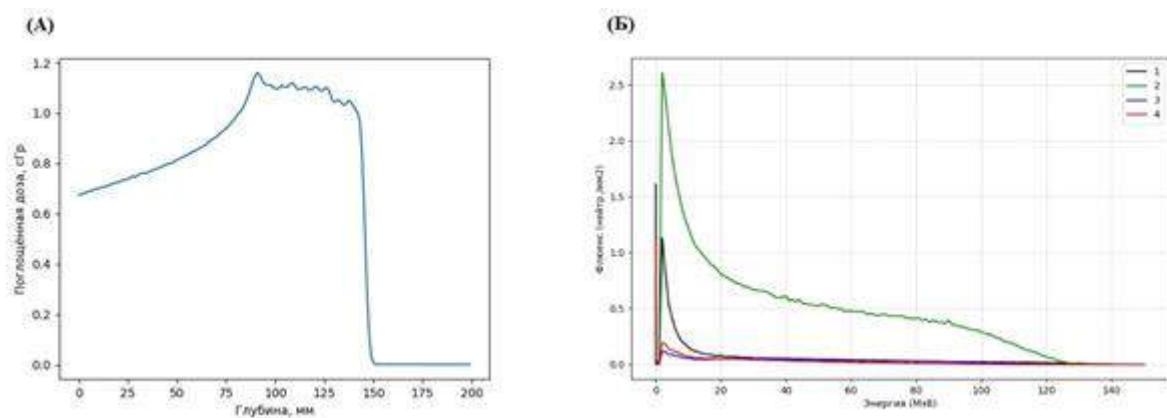


Рисунок 23 – А – глубинное дозовое распределение протонов в водном фантоме PTW MP3-P, Б -распределение флюенсов нейтронов по энергии в различных частях процедурной КПТ, 1 – после входного коллиматора, 2 – после гребенчатого фильтра, 3 – за задней стенкой фантома, 4 – у боковой стенки фантома

По полученным спектрам, используя зависимость с рисунка 22, определяется суммарная эффективная доза нейтронного излучения, которая в последствии нормируется на 1 Гр исходя из значений реальной дозы, высвобождающейся в фантоме после прохождения 10^8 и 5×10^8 протонов для случаев с большой и малой мишенью соответственно.

7. Облучение и анализ реакции биологических объектов

В отчетном году были проведены исследования облученных клеток с использованием флуоресцентного микроскопа (микроскоп Nexascope 620FL, увеличение 40Х.) с использованием следующих методов. В то время как существенно снизилась доступность наборов иностранного производства для детектирования пролиферативного потенциала облученных раковых и нормальных клеток, была проделана работа по подбору условий визуализации делящихся клеток с применением биоорганических реагентов российского производства. Был использован метод включения модифицированных нуклеотидов во время удвоения ДНК, предшествующей делению клеток на две дочерние. Были использованы реактивы фирмы Lumiprobe для мечения методом клик-химии коньюгатами азива и флуоресцентных красителей клеток, включивших в состав геномной ДНК этинил-дезоксиуридин (EdU) – структурный аналог нуклеотида тимина, несущий алкиновую группу, реакционноспособную в адрес модифицированных азидов. Продуктом мечения становятся клетки, находящиеся в стадии синтеза ДНК или деления. По пропорции окрашенных азидом клеток устанавливается число делящихся клеток в популяции, что при сопоставлении с необлученными клетками позволяет определить долю клеток, потерявшими способность к делению, в приложении к опухолевым клеткам – по прогрессированию опухоли. Также данный метод может быть использован для оценки воспроизведения популяцией опухолевых клеток своей численности при потере во время облучения доли радиочувствительных клеток в популяции и сохранении радиорезистентных клеток, ответственных за рецидивы после лечения лучевой терапией. Методика на российских реактивах существенно более дешевая, чем коммерчески доступные иностранные аналоги, что необходимо для работы с большой статистикой на множестве образцов при построении дозовых кривых. Облучению подвергались два вида клеток: рак толстой кишки HT-29 и ADSC мезенхимальные стволовые клетки жировой ткани человека (фибробласты). Клетки облучались в трех режимах: одноимпульсный флэш-режим (SPLASH), стандартный флэш-режим (FLASH) и конвенциональный режим (CONV). Пробирки с клетками облучались водном фантоме в области модифицированного пика Брэгга и на пролете. Для флуоресцентной микроскопии были выбраны тесты на репликацию ДНК (EdU тест), окрашивали образцы в лунках 96-луночного планшета в течении пяти суток после облучения с шагом 24 часа. Окрашенные образцы фиксировались с помощью параформальдегида. Подсчет общего количества клеток в кадре производился с помощью добавления красителя dapi. Для анализа клеточной гибели использовали красители аннексин для окраски апоптотических клеток и йодистый пропидий для некротических клеток. Подсчет общего количества клеток в кадре производился фазово-контрастном

режиме. Для оценки клеточной гибели клетки в лунках окрашивались через 24 и 48 часов после облучения без фиксации.

Анализ показал, что спустя 24 часа в стандартном и одноимпульсном флэш-режиме облучения обнаруживалась тенденция повышения доли апоптотических клеток НТ-29 по сравнению с конвенциональным режимом. Во всех режимах через 48 часов после облучения наблюдался заметный уровень некроза этих клеток. Также были обнаружены параллельные тренды в уровне репликации ДНК у клеток НТ-29 в течение 120 часов пострадиационного периода.

8. Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах

Псевдомагнитные поля в нанографитовых пленках

При исследовании проводимости нанографитовых плёнок было обнаружено скачкообразное увеличение удельного электрического сопротивления примерно на 4–6 порядков величины вследствие увеличения транспортного тока до определённого критического значения [31]. Критический транспортный ток в комнатных условиях имеет значения 5–500 мА (в зависимости от условий осаждения НГ плёнки, размера образца и размера подводящих контактов) при постоянном напряжении в диапазоне 5–100 В. Вольтамперная характеристика (ВАХ) и электрические процессы переключения в НГ плёнке показаны на рисунке 24. В точке переключения ток скачком переходит в метастабильное состояние «ВЫКЛ», в котором удельное электрическое сопротивление на четыре–шесть порядков величины выше, чем в состоянии «ВКЛ». После отключения напряжения образец возвращается в состояние «ВКЛ» с низким удельным сопротивлением, и переключатель снова может работать. Лавинообразное нарастание псевдомагнитного поля в момент переключения сопротивления приводит к сильному нагреву и даже испарению области плёнки под одним из электрических контактов, т.е. к небольшому выгоранию, которое можно наблюдать под микроскопом.

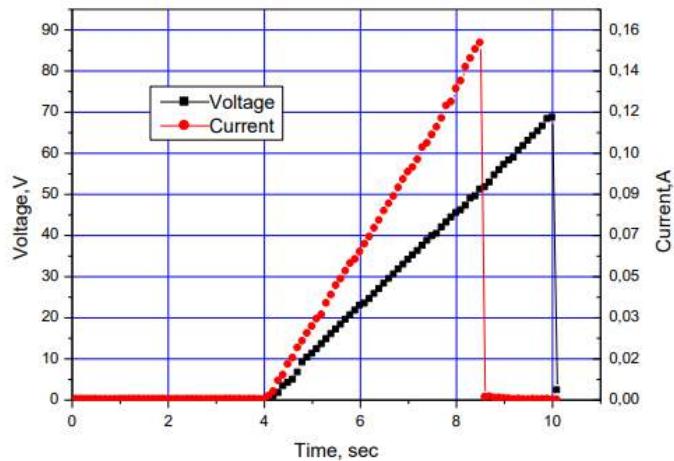


Рисунок 24 – Вольтамперная характеристика (ВАХ) НГ пленки, толщиной 1 мкм на кварцевой подложке при комнатной температуре. Видно, что ток выключается раньше напряжения, то есть выключение происходит по внутренней причине, однозначно связанной исключительно с величиной тока

Процесс переключения в пленке нанографита сопровождается резким повышением температуры, что приводит к возникновению оптического излучения и псевдомагнитного поля. Это излучение регистрировалось с помощью фотодиода [32]. Схема регистрации

оптических импульсов представлена на рисунке 25. Зависимость напряжения на фотодиоде от времени регистрации представлена на рисунке 26. Видно, что регистрируемые энергии оптических импульсов находятся на дискретных энергетических уровнях с фиксированным расстоянием между ними $\Delta E = 0,0022097$ эВ. Точная фиксация уровней с точностью до седьмого знака после запятой свидетельствует о когерентности излучения и его аналогии с уровнями Ландау [33]. Оптические и магнитные процессы в нанографитовых пленках объясняются динамикой магнитных вихрей в джозефсоновской среде пленки, подробно описанной в работах [32,33]. Нижнее критическое поле, соответствующее началу проникновения магнитных вихрей в нанографитовую пленку H_{C1} , составляет приблизительно $0,22 \times 10^{-8}$ Тесла. Глубина проникновения магнитного поля в пленку составляет 0,95 мм [34]. Следовательно, магнитное поле Земли легко проникает на всю толщину нанографитовой пленки. Магнитные вихри, движущиеся внутри пленки, испускают излучение, достигая границы НГ пленки, толщина которой составляет 1 мкм. Из рисунка 26С видно, что время между последовательными импульсами излучения постоянно и равно 5×10^{-6} сек., что соответствует частоте 2×10^5 Гц. Вспышки оптического излучения при выходе квантов магнитного потока на поверхность НГ пленки связаны с разрушением куперовских пар носителей тока.

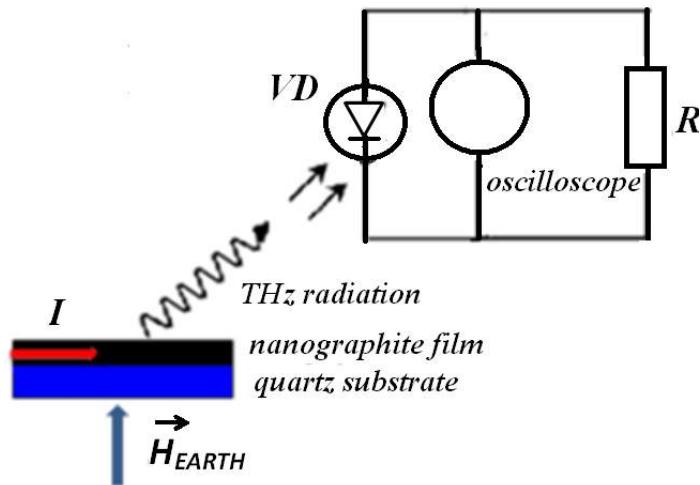


Рисунок 25 – Схема регистрации оптических импульсов

Процесс переключения в нанографитовой плёнке сопровождается резким повышением температуры, что, с одной стороны, вызывает оптическое излучение, а с другой – термомеханические напряжения, создающие псевдомагнитное поле. Магнитное поле ΔB , соответствующее минимальной разности энергий между уровнями Ландау $\Delta E = 0,0022097$ эВ, определяется известным выражением:

$$\Delta B = \frac{\Delta E m_e^*}{e\hbar} = 0,66 \text{ Т}, \quad (14)$$

где $m_e^* = 0,03m_e$ – эффективная масса электрона, e – заряд электрона, \hbar – приведённая постоянная Планка.

Как видно на рисунке 26А, максимальный уровень напряжения, достигаемый уровнями Ландау, составляет $\Delta E_{max} = 0,3$ Вольта, что соответствует суммарному псевдомагнитному полю $\Delta B_{max} = \Delta E_{max}/\Delta E \times \Delta B = 90$ Тесла. Однако на рисунке 26А видно, что фотодиод вошёл в насыщение, т.е. максимальный уровень напряжения и псевдомагнитное поле могут быть в несколько раз выше. Линейная аппроксимация максимального пика на рисунке 26А дает максимальное псевдомагнитное поле 380 Тесла. Лабораторный рекорд индукции постоянного магнитного поля, длившегося тысячные доли секунды, составляет всего 85 Тесла [2].

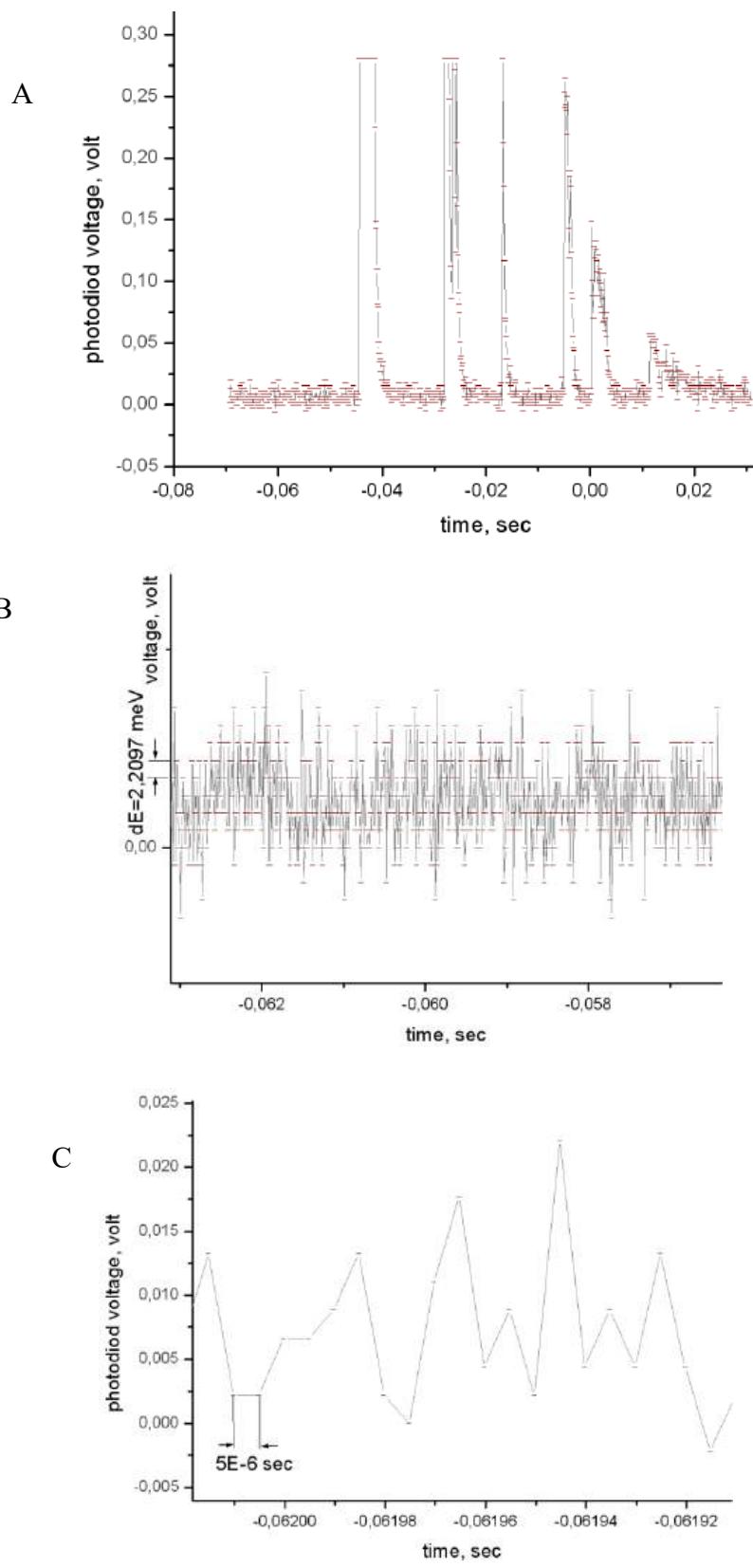


Рисунок 26 – Напряжение фотодиода в зависимости от времени регистрации: Общий вид зависимости, В – участок графика А при увеличении, позволяющий увидеть линейную структуру энергетического спектра (уровни Ландау), С – график при максимальном увеличении, позволяющий увидеть временную структуру напряжения фотодиода. Видно, что минимальное расстояние между точками излучения оптических импульсов составляет 5 мкс. Регулярное излучение импульсов с интервалом 5 мкс свидетельствует о движении магнитных квантов по толщине НГ пленки со скоростью 0,2 м/с

Несмотря на различие между графеном и графитом, авторы работы [35] наблюдали квантовый эффект Холла в кристаллах графита толщиной до сотен атомных слоев. Визуализация псевдомагнитного поля в пленках нанографита с использованием оптического излучения с уровней Ландау значительно упрощает детектирование магнитного поля по сравнению с предложением авторов [2], которые использовали сканирующий тунNELНЫЙ микроскоп при температуре 7,5 К для визуализации уровней Ландау. В нашем случае измерения оптического излучения с уровнями Ландау проводились с помощью фотодиода при комнатной температуре. Простые оценки тепловых напряжений в нанографитовых пленках позволяют оценить механизм формирования псевдомагнитного поля. Вкратце эта оценка сводится к известному соотношению: $\frac{l_B}{l} = \alpha \Delta T$, где α — коэффициент теплового расширения НГ пленки на кварцевой подложке, l — размер горячей точки на поверхности НГ пленки в момент максимального скачка магнитного поля, который можно определить с помощью микроскопа по точкам расплава на поверхности пленки. Лавинный рост псевдомагнитного поля в момент переключения сопротивления приводит к сильному нагреву и даже испарению области пленки под одним из электрических контактов, т.е. к небольшому выгоранию, которое можно наблюдать в микроскоп. Аналогичное явление суперинжекции и пробоя поверхности пленки наблюдалось в случае карбоновой пленки [36]. В предыдущем выражении $l_B = \sqrt{\frac{\hbar c}{eB}}$ магнитная длина, \hbar — приведенная постоянная Планка, c — скорость света, e — заряд электрона, B — индукция магнитного поля, ΔT — разность температур при нагревании пленки в пиковом магнитном поле $\Delta T \approx E_{\max}/k_B \cong 3500\text{K}$, где $E_{\max} = 0,3\text{ эВ}$, как показано на рисунке 26. Что касается коэффициента теплового расширения α НГ пленки, необходимо учитывать расширение как самой пленки, так и кварцевой подложки. Общее значение α составляет $\sim 5 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$. Соответствующие расчеты дают магнитную индукцию $B = 200$ Тесла при $l \sim 100\text{ нм}$. Резкие оптические скачки на рисунке 26А соответствуют магнитным импульсам лавинообразного магнитного потока, возникающего вследствие термомагнитной неустойчивости [37]. Для проверки гипотезы о термомагнитной неустойчивости проанализируем рисунок 26 более подробно. Определим отношение коэффициентов магнитной диффузии D_m и термодиффузии D_t :

$$\tau = \frac{D_m}{D_t} = \frac{\mu_0 \sigma K}{c}, \quad (15)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ Гн}\cdot\text{м}^{-1}$ — магнитная постоянная, $\sigma = 100\text{ Ом}\cdot\text{м}^{-1}$ — проводимость, $K = 130\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ — теплопроводность, $C = 7 \cdot 10^5\text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$ — теплоёмкость нанографитовой пленки. Тогда $\tau \cong 10^{-8} \ll 1$. Это соответствует случаю жёсткого сверхпроводника с вязким

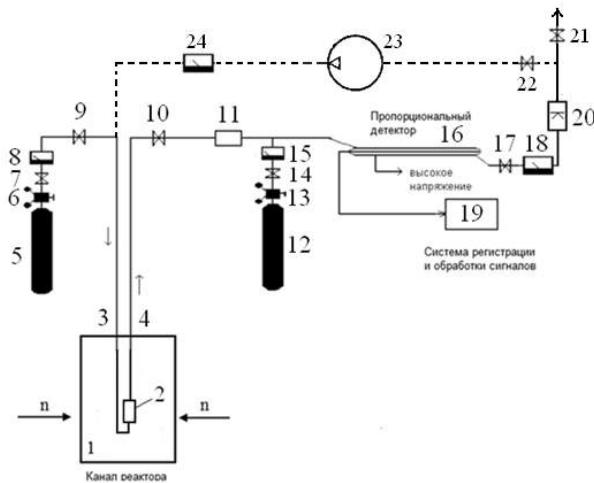
магнитным потоком, когда время изменения магнитного потока значительно меньше времени изменения температуры. Важно отметить, что в адиабатическом режиме работы нанографитовой плёнки тепло, генерируемое резким изменением магнитного потока, выделяется мгновенно и локально и не может рассеяться за счёт охлаждения в рассматриваемом масштабе времени.

9. Разработка перспективных методов детектирования нейтронов и протонов

Задача внедрения в практическое применение проточного газового радиохимического метода детектирования нейтронов находится в разработке в течение нескольких лет и имеет весьма важные практические применения, которые проявились в последние годы – детекторы и мониторы нейтронных потоков и их пространственных распределений, детекторы радиоактивных веществ, термометры термоядерной плазмы. По тематике задачи получено 3 патента РФ.

Монитор нейтронного потока для реактора ПИК

В 2025 году проводилась разработка газового радиохимического монитора нейтронного потока для реактора ПИК. Особенность такого монитора состоит в том, что он должен регистрировать рекордный нейтронный поток с плотностью до 10^{15} н/см²/сек в очень небольшом по габаритам экспериментальном канале реактора ПИК. Особенностью технологии является пространственное разделение области детектирования нейтронов посредством (n, α)-реакций с образованием инертных радиоактивных газов с последующей их транспортировкой с помощью транспортного газа Не в удаленную от активной зоны и защищенную область, где расположен проточный счетчик регистрации распадов образовавшегося радиоактивного газа ^{37}Ar . В такой постановке технология позволяет резко снизить фоновую нагрузку счетчика от γ -квантов и других конкурирующих процессов. Для размещения ампулы детектора в узком технологическом канале ядерного реактора ПИК ее размеры должны быть достаточно малы, что позволяет использовать малое количество активного вещества оксалата кальция в ампуле детектора. Небольшое количество активного вещества в ампуле детектора, кроме того, уменьшит нагрузку начитывающую электронику. Фактически предельные размеры ампулы детектора можно считать «точечными», и такие ампулы можно использовать для получения пространственного распределения нейтронного потока вдоль активной зоны высокопоточного ядерного реактора. В проточном газовом радиохимическом мониторе используется свойство свободного выхода атомов инертного радиоактивного газа ^{37}Ar , образующихся в ядерной реакции $^{40}\text{Ca} (n, \alpha)^{37}\text{Ar}$, из кристаллической решетки оксалата кальция CaC_2O_4 . Схема газового тракта радиохимического нейтронного монитора представлена на рисунке 27.



Обозначения на схеме: 1 – канал реактора, 2 – микроампула детектора, 3 – трубка входного потока He, 4 – трубка выходного потока смеси He с радиоактивным аргоном, 5, 12 – баллоны He и гасящей добавки CH₄ соответственно, 6, 13 – регуляторы давления, 7, 9, 10, 14, 17, 21, 22 – регуляторы расхода газа, 8, 15, 18, 24 – расходомеры, 11 – геттер, 16 – пропорциональный счетчик, 19 - система регистрации и обработки сигналов, 20 – азотная ловушка, 23 – насос – компрессор

Рисунок 27 – Схема газового тракта проточного радиохимического монитора нейтронов

В стационарном режиме облучения ампулы (при постоянном потоке ионизирующего излучения Φ и постоянном расходе L газа-носителя) вся вновь образовавшаяся активность сверх равновесной удаляется из объема ампулы потоком газа-носителя. Поэтому скорость счета распадов в смеси радиоактивного газа с газом-носителем связана с потоком ионизирующего излучения известным соотношением [38]:

$$I = \frac{\rho_n V_a P_c N_A \lambda_{37} \sigma_{(n,\alpha)} \Phi V_c}{M_{CaC_2O_4} L_{He}} \quad (16)$$

В соотношении (16) использованы следующие обозначения: I — число распадов в секунду радиоактивного ³⁷Ar в счетчике; $\rho_n = 1 \text{ г}/\text{см}^3$ — плотность насыпного порошка оксалата кальция в ампуле; V_a , V_c — рабочий объем в см^3 ампулы и счетчика соответственно; P_c — давление в счетчике в физических атмосферах; N_A — число Авогадро, $\lambda_{37} = 2,3 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ — константа распада ³⁷Ar; $\sigma_{(n,\alpha)} = 2,0 \times 10^{-26} \text{ см}^2$ — усредненное по спектру нейтронов сечение ядерной реакции ⁴⁰Ca(n,α)³⁷Ar; Φ — плотность потока нейтронов ($\text{нейtron}/\text{см}^2/\text{с}$); $M_{CaC_2O_4} = 128$ — молекулярная масса оксалата кальция; L_{He} — расход транспортного газа He в $\text{см}^3/\text{сек}$. Выражение (16) применимо при $V_a/L_{He} \ll 1/\lambda_{37}$.

Данные по скорости счета микроампулы в зависимости от объема микроампулы V_a и расхода транспортного газа L для потока быстрых нейтронов $\Phi = 1,25 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ с энергией $E > 0,8 \text{ МэВ}$ в центре АЗ реактора ПИК представлены на рисунке 28.

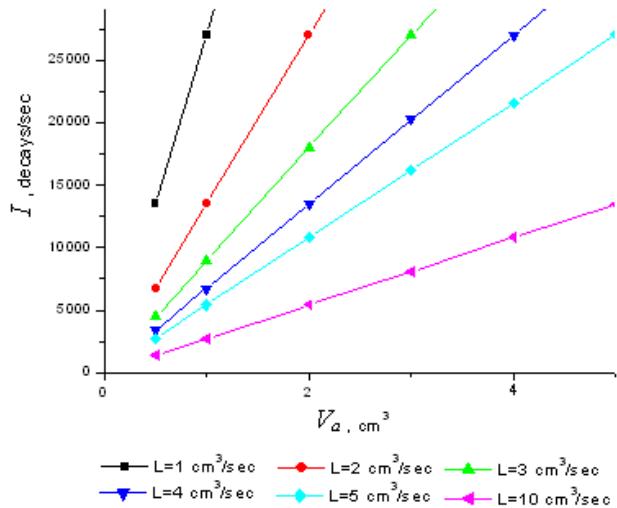


Рисунок 28 – Семейство зависимостей скорости счета распадов I от объема ампулы детектора V_a для различных значений расхода транспортного газа L

Как видно из рисунка 28, увеличение расхода транспортного газа L и уменьшение объема ампулы детектора V_a уменьшает скорость счета распадов. Данные обстоятельства являются благоприятными для регистрации рекордных нейтронных потоков в центрах АЗ высокопоточных ядерных реакторов, причем эти потоки могут быть зарегистрированы чрезвычайно малыми, буквально «точечными» детектирующими ампулами. По итогам данного рассмотрения была написана статья «Радиохимический монитор нейтронов для высокопоточных ядерных установок» и опубликована в журнале «Инноватика и экспертиза». 2025, выпуск 1(39) стр.169-176.

10. Комплексные испытания радиационно-защитных материалов

В соответствии с Нормами пожарной безопасности ГОСТ Р 53264-2019 (см. работу [3]) материалы спецодежды для оценки радиационно-защитных свойств проходят три вида испытаний: первое – проверка ослабления гамма-излучения 122 кэВ изотопа кобальт-57; второе – проверка ослабления бета-излучения до 2 МэВ изотопа стронций-90; третье – проверка на дезактивируемость. В первом и втором случае используются закрытые источники ионизирующих излучений. Такие испытания являются безотходными, считаются "чистыми" и выполняются в ИЯИ РАН в соответствии с лицензией. Приоритет созданного в ИЯИ РАН безопасного способа контроля радиационно-защитных свойств материалов защищён патентом (см. работу [39]).

Третий вид испытаний следует выполнять с использованием открытых радиоактивных источников, он сопровождается получением жидких радиоактивных отходов, нуждающихся в утилизации, что представляет опасность для метрологов и экологии. Испытания на дезактивируемость считаются "грязными" и выполняются в специализированных лабораториях. Таким образом, существующая ситуация отрицательно сказывается на экономических показателях производства СИЗ. Вместе с тем патентный поиск показал, что существуют подходы, позволяющие устранить недостатки "грязных" технологий.

10.1. Безопасные испытания материала СИЗ ионизирующим излучением

Одним из достижений ИЯИ РАН является разработка для промышленности безопасного способа контроля радиационно-защитных материалов с помощью ионизирующего излучения (см. работу [40]). Для просвечивания материала использовались источники активностью меньшую минимально значимой на рабочем месте (МЗА) в сочетании с аппаратурой высокого разрешения, что обеспечивает безопасность персонала и окружающей среды (см. работу [41]). Наряду с прецизионной аппаратурой, созданной для ядерно-физических измерений, испытывалась работа серийного гамма-спектрометрического комплекса СКС-07П-Г41, оснащённого детектором БДЭГ2-38-01 (см. работы [42, 43]). Испытания бета-излучением проводились с помощью радиометра МКС-01Р в комплекте с блоком сцинтилляционного детектора БДКБ 01Р и коллиматором. Испытывались радиационно-защитные материалы, предоставляемые предприятием АО «ПТС» в соответствии с договором №2025/5 между ИЯИ РАН и ПТС. В 2025 г. проведены испытания двух партий материалов, что зафиксировано в отчётах.

10.2. Испытание гамма-спектрометрического комплекса СКС-07П-Г41

В ходе проверки радиационно-защитных свойств материалов, полученных от АО «ПТС», испытывалась работа серийного гамма-спектрометрического комплекса СКС-07П-Г41. Результат испытания данного комплекса изложен в статье «Проверка радиационно-защитных свойств текстиля для СИЗ с помощью гамма-спектрометра» (авторы М.Н. Лифанов и В.М. Скоркин). Статья послана в отраслевой журнал «Технология текстильной промышленности» в июле 2025 г. и находится в очереди на публикацию. Статья знакомит специалистов, занимающихся созданием функционального или барьерного текстиля, с разработанной в ИЯИ РАН методикой измерения свойств радиационно-защитных материалов, представляющих новизну для текстильного материаловедения. Также представлен инструмент для таких исследований и рекомендации по его использованию.

10.3. Имитация радиоактивного загрязнения для оценки дезактивируемости СИЗ

Проверка на дезактивируемость по существующим правилам в ИЯИ РАН не производится. Исследования показали, что коэффициент дезактивации как параметр радиационно-защитных свойств материалов можно оценивать новым безопасным способом с использованием имитации – путём замены опасного компонента измерения на безопасный. При этом испытания проводятся в неизменных рамках данного физического явления – адгезии (см. работу [44]).

По материалам лабораторной работы и патентного поиска, проведённого в данном направлении, оформлена заявка на патент № 2024134034 «Способ безопасной оценки дезактивируемости материалов для средств индивидуальной защиты (СИЗ)» (см. работу [45]). По состоянию на 18.11.25 экспертизой ФИПС принято решение о выдаче Патента на изобретение. Следует заметить, что для защиты положений, изложенных в заявке, шла интенсивная переписка в течение года.

10.4. XII Международная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях»

XII Международная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», посвященная 80-летию атомной отрасли России, в контексте развития ядерной и радиационной безопасности, состоялась в г. Москве 29-31 октября 2025 года при поддержке Госкорпорации «Росатом», Института проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ РАН) и других заинтересованных ведомств федерального уровня. Коллектив авторов: Альбац Е.А. (АО «ПТС»), Лифанов

М.Н. (ИЯИ РАН), Логинов В.И. (НИИПО МЧС РФ) представил доклад «Радиационно-защитная одежда для работы в экстремальных условиях» (см. работу [45]).

В докладе представлен комплект радиационно-защитной одежды типа «РЗК», выпускаемый серийно предприятием АО «ПТС» для подразделений МЧС, охраняющих АЭС. Изложена история его создания, начало которой положили теоретические исследования, выполненные в ИЯИ РАН. В ходе прикладных работ коллектив разработчиков при ведущем научном сопровождении ИЯИ РАН разработал антирадиационные материалы, первые образцы защитной одежды нового типа; наконец, была создана новая отрасль промышленности. Применение такой спецодежды отвечает принципу ALARA (As Low As Reasonably Achievable), согласно которому "все дозы облучения должны поддерживаться на таких низких уровнях, какие только разумно достигнуть с учётом экономических и социальных факторов". Также были изложены перспективы дальнейшего развития отрасли по производству радиационно-защитных СИЗ, заключающиеся в следующем.

- Расширение сферы применения СИЗ данного типа – использование для ликвидации последствий ядерного терроризма.
- Включение СИЗ в нормы материально-технического обеспечения АЭС, в том числе, строящихся за рубежом, для экспортного продвижения отечественной продукции.
- Создание государственного резерва СИЗ для использования в случае возникновения техногенных катастроф подобных Чернобыльской.
- Возрождение исследований в области текстильного материаловедения для совершенствования существующих материалов, содержащих свинец, с целью улучшения воздухо- и паропроницаемости, драпируемости и т.п.
- Развитие исследований в области текстильного материаловедения с целью снижения массы спецодежды, например, за счёт использования висмута вместо свинца.
- Развитие приборной базы, предназначенной для контроля радиационно-защитных свойств текстильных материалов.
- Развитие приборной базы, предназначенной для дозиметрического контроля при эксплуатации СИЗ ИТ.

11. Определение элементного состава и структуры композитных материалов методами активационного анализа и резонансной флуоресценции на тормозном излучении электронного ускорителя ЛУЭ-8

11.1. Радиометрическое детектирование излучений

Радиометрические измерения с пучком электронов ускорителя выполнены при параметрах пучка с энергией 8 МэВ, длительностью импульса 3 мкс, средним током 1-40 мА и частотой следования импульсов 50 c^{-1} , что соответствует временной интервал между импульсами ускорителя 20 мс. В измерениях внутри защитного контейнера использовался детектор гамма-излучения детектор БДМГ-08Р на основе газоразрядных счетчиков СИ-22Г с чувствительностью $\sim 1\text{ c}^{-1}\cdot\text{nЗв}^{-1}\cdot\text{мин}$. При подаче пучка гамма-детектор располагался на расстоянии около 30 см от W-конвертера под углом $\sim 60^\circ$ для регистрации гамма-излучения. В эксперименте было измерено соотношение интенсивностей тормозного излучения под углами 60° и 0° с помощью детектора БДКБ-01Р. Измеренное отношение интенсивностей тормозного излучения под этими углами отличается в 5 раз. В процессе измерений сигналы с детекторов от регистрации гамма-излучения передавались модулями Raspberry Pi на сервер и обрабатывались программой для формирования каждую минуту данных о скорости счета импульсов в минуту в файле базы данных сервера (см. работу [46]). В режиме онлайн эти данные преобразовывались во временную диаграмму мощности дозы гамма-излучения с интервалом 1 минута и отображались на диаграммах веб-страницы. На рисунке 29 показан уровень гамма-излучения 3 мкЗв/ч внутри пустого контейнера (позиция 1) от тормозного излучения ускорителя. В позиции 2 кроме тормозного излучения зарегистрировано дополнительное рассеянное излучение от мишленного устройства. Позиция 3 на диаграмме соответствует регистрации рассеянного излучения от комбинированной мишени из образцов Cd, In и композитного металлоорганического материала (резина, акрил, Pb и др.). Видно, что помимо постоянного во времени тормозного и рассеянного излучения возникает активационное излучение от распада радионуклидов из фотоядерной реакции. После отключения пучка ускорителя происходит резкое снижение фона тормозного и рассеянного излучения, но остается распределенное во времени излучение от активированных радионуклидов (позиция 4). Характеристики этого излучения могут быть определены по временной зависимости наведенной активности образовавшихся радионуклидов.

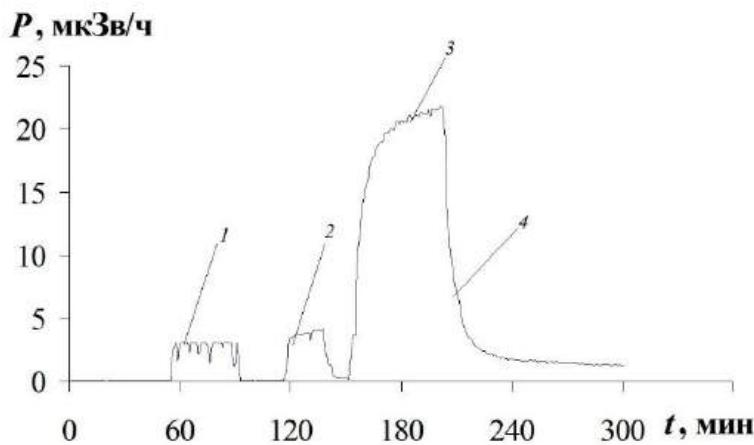


Рисунок 29 – Гамма-фон, измеренный детектором БДМГ-08 внутри защитного контейнера с пучком электронов на W-радиаторе ускорителя. Обозначения: 1 – мощность дозы гамма-излучения в пустом контейнере; 2 – уровень гамма-излучения в контейнере с мишленным устройством; 3 – интенсивность гамма-излучения внутри контейнера с пучком тормозных фотонов на комбинированной мишени с композитным материалом образцами; 4 – гамма-фон внутри контейнера после прекращения подачи пучка электронов

С целью измерения активности изомерных состояний по временной зависимости наведенной активности изомеров проведены тестовые облучения комплекта образцов Cd и In массой $m \approx 5,1$ г тормозными фотонами с плотностью потока $\Phi \sim 5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ в течении $t_a = 40$ минут. В процессе облучения образцов происходило возбуждение и распад изомеров ^{113m}In , ^{115m}In , ^{111m}Cd , ^{113m}Cd . Гамма-излучение от распада изомеров регистрировалось детектором БДМГ-08Р. Максимальная измеренная мощность дозы 0,3 мкЗв/ч от распада изомеров была зарегистрирована в конце облучения. Наибольший вклад в измеренную дозу активационного излучения (80%) вносит изомер ^{115m}In с изотопной массой 3,4 г, энергией излучения $E_\gamma = 336$ кэВ и гамма-постоянной 940 мкР/ч. Выход реакции возбуждения изомера ^{151m}In , оцененный по методике, изложенной в работе [47], составит $\approx 2,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. При помощи аппроксимации распределения излучения от нескольких радионуклидов после окончания активации можно определить элементный состав композитных материалов.

11.2. Спектрометрические измерения излучения изомеров

Выполнены измерения спектров гамма-излучения активированных изотопов индия и кадмия, а также выхода реакции в случае неупругого рассеяния фотонов тормозного излучения на ЛУЭ-8-5 с возбуждением изомерных состояний индия и кадмия: $^{111}\text{Cd}(\gamma, \gamma')^{111m}\text{Cd}$, $^{113}\text{Cd}(\gamma, \gamma')^{113m}\text{Cd}$, $^{113}\text{In}(\gamma, \gamma')^{113m}\text{In}$, $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$. Использованы образцы естественной смеси изотопов кадмия, массой 1,536 г, и индия, массой 3,541 г., а также обогащенный изотоп ^{113}Cd , массой 11,618 г. Характеристики образцов приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Характеристики образцов кадмия и индия

Элемент образца	Атомный вес изотопа	Содержание изотопа, %	Масса изотопа в образце, г	Число ядер, 10^{21}
^{48}Cd , ест.	111	12,80	0,196	1,064
^{48}Cd , ест.	113	12,22	0,188	1,003
^{48}In , ест.	113	4,23	0,150	0,800
^{48}In , ест.	115	95,77	3,391	17,76
^{113}Cd	113	≈ 100	11,618	61,94
$^{110}\text{Cd}(\gamma, n)$	110	12,49	0,190	1,041

Исследуемые образцы Cd и In активировались тормозными гамма-квантами от импульсного электронного пучка, диаметром 8 см, длительностью 3 мкс и при токе ~ 200 мА на расстоянии 5 см от W-радиатора. Спектральная ширина электронного пучка при энергии 8 МэВ была около 0,5 МэВ. После облучения около 40 минут и выдержки 5 минут проводилась регистрация излучения от активированных образцов с помощью сцинтилляционного спектрометра на основе кристалла NaI (Tl) размером 5×5 см² производства фирмы ORTEC. Для снижения фона спектрометр был окружен свинцовой защитой толщиной 10 см. Уровень фона при энергии от 100 кэВ до 800 кэВ был ~ 10 с⁻¹. С помощью источников ОСГИ проведена калибровка и определена эффективность регистрации спектрометра в интервале энергий 100-800 кэВ с погрешностью 4% и энергетическим разрешением 12 кэВ при $E_\gamma = 122$ кэВ от источника ^{57}Co , активностью 10^5 Бк. По итогам измерений были получены спектры, представленные на рисунке 30 и рисунке 31.

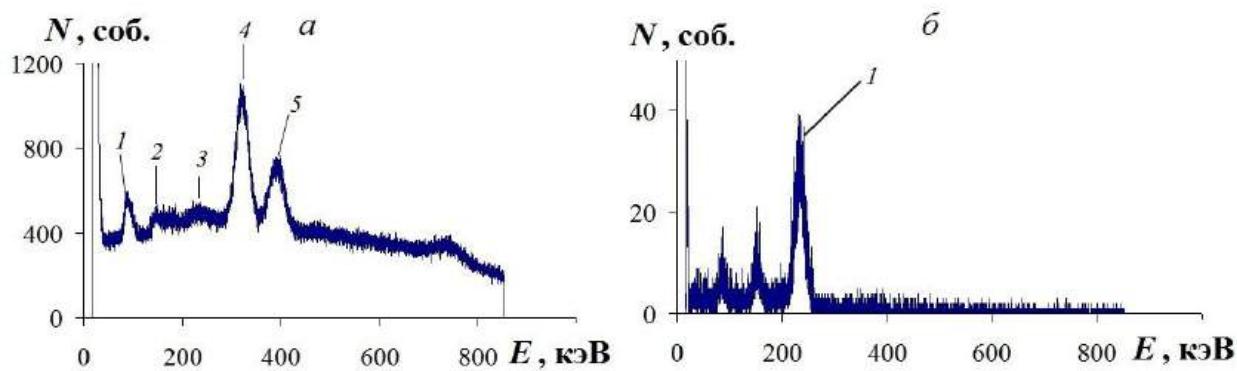


Рисунок 30 – Спектр гамма-излучения от активированных образцов индия и кадмия (а). Обозначения: 1 – излучение от радионуклида ^{109}Cd (88 кэВ), 2 – излучение изомера $^{111\text{m}}\text{Cd}$ (151 кэВ), 3 – излучение изомера $^{111\text{m}}\text{Cd}$ (245 кэВ), 4 – излучение изомера $^{115\text{m}}\text{In}$ (336 кэВ), 5 – излучение распада $^{131\text{m}}\text{In}$ (392 кэВ); спектр гамма-излучения с энергией 263,5 кэВ от изомера кадмия $^{113\text{m}}\text{Cd}$ (б)

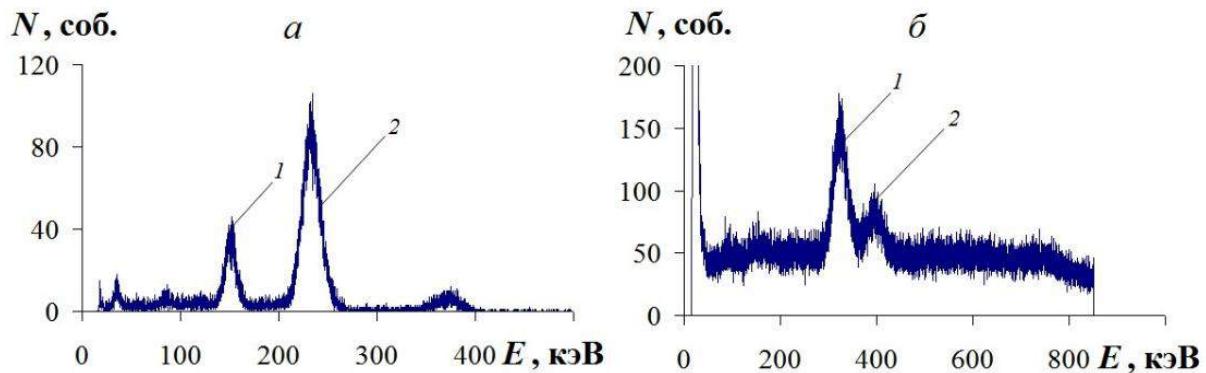


Рисунок 31 – Спектр гамма-излучения с энергией 151 кэВ и 245 кэВ от ядерного изомера кадмия ^{111m}Cd (а); спектр гамма-излучения с энергией 336 кэВ и 392 кэВ от изомеров изотопов индия ^{115m}In и ^{113m}In соответственно

По измеренным спектрам от активированных образцов были определены скорости счета в пиках спектра, соответствующих энергиям распада изомеров. По ним могут быть рассчитаны элементный состав композитного материала, содержащего изотопы индия и кадмия по методике и формулам, представленным в работе [10].

В таблице 9 приведены параметры изомерных состояний Cd и In и результаты измерений.

Таблица 9 – Результаты измерений активности изомеров Cd и In при возбуждении тормозным излучением с эффективной энергией 2,6 МэВ и интенсивностью – $5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$

Изомер	$T_{1/2}$, ч	Энергия гамма, кэВ	Скорость счета, с^{-1}
^{111m}Cd	0,809	245	195
^{113m}In	1,658	392	250
^{115m}In	4,486	336	960
^{113m}Cd	$1,2 \cdot 10^5$	264	400

12. Определение возможного места ADS в атомной энергетике в сравнении с быстрыми реакторами и гибридными термоядерными реакторами и трансмутация минорных актиноидов. Разработка каскадной подкритической сборки, с разделительной системой, обеспечивающей одностороннюю связь между двумя ее составляющими, которая может быть использована в энергетических ADS в условиях долговременной работы

К глобальным проблемам современной ядерной энергетики относятся: накопление радиоактивных долгоживущих продуктов ядерных реакций, прежде всего минорных актинидов - МА, их переработка и утилизация, потенциальный риск возникновения аварий, в том числе связанных с потерей управления цепной ядерной реакции, замыкание ядерного топливного цикла, развитие ядерной энергетики на основе уран - ториевого цикла.

Существуют и рассматриваются несколько направлений для решения этих проблем с использованием: реакторов на быстрых нейтронах (БР), гибридных термоядерных реакторов, ускорительно – управляемых систем (ADS) [48].

Целями исследования является продолжение работы по определению возможного места ADS в структуре атомной энергетики, сравнительный анализ трансмутации минорных актиноидов в ADS, быстрых реакторах и гибридных термоядерных реакторах, основные преимущества ADS. Исследование по снижению мощности ускорителя (каскадная ADS) и сокращению расходов на собственные нужды. Оценка порогового коэффициента умножения ADS, выше которого ADS становится рентабельной с точки зрения производства энергии. Схема исследовательского стенда ADS на основе сильноточного ускорителя ИЯИ РАН с учетом каскадного принципа и с использованием существующей инфраструктуры нейтронного комплекса и сильноточного ускорителя ИЯИ РАН.

Продолжены работы по уточнению основных показателей рентабельности ADS. Показано, что по сравнению с быстрыми реакторами, в которых концентрация МА в топливе ограничена 5-9% [48, 49], возможно создание ADS с уровнем загрузки МА, превышающим равновесный уровень, что обеспечивает их эффективное выгорание при сохранении системы в подкритическом состоянии. При этом в бланкете ADS возможно расширенное воспроизведение топлива, пригодного для использования в ядерных реакторах. Гибридные термоядерные реакторы, в сравнении с ADS, нарабатывают аномально высокие значения изотопов ^{238}Pu или ^{232}U , что значительно усложняет и удорожает процесс обращения с ядерным топливом. На примере ADS с пучком мощностью 1 МВт и энергией протонов 1 ГэВ сделана оценка по выгоранию МА, прежде всего изотопов америция и кюрия в активной зоне и наработке изотопов плутония в зоне воспроизведения

в зависимости от коэффициента умножения – M . Показано, что для ADS с указанными параметрами пучка при коэффициенте умножения $M \sim 45$ возможно выгорание изотопов Am и Cm ~ 29 кг в год, что соответствует годовой наработке этих изотопов в одном реакторе ВВЭР-1000. При этом для $M \geq 20$ энергетический баланс может быть положительным с учетом электроэнергии, произведенной на ADS и потенциальной энергии деления в наработанных делящихся изотопах. Для выгорания изотопов Am и Cm от 10 блоков ВВЭР-1000, потребуется ускоритель мощностью ~ 10 МВт. Эта мощность может быть сокращена примерно до 2,5 МВт в случае использования двузонной каскадной схемы [50].

Один из главных недостатков ADS - высокая стоимость первичных нейтронов, обусловленная необходимостью иметь ускоритель с мощным пучком (несколько МВт) и большими затратами электроэнергии на собственные нужды, потребляемой ускорительными комплексами (десятки МВт). Для частичной компенсации этого недостатка может быть использовано сочетание ГЭС, как эффективного накопителя, конденсатора и преобразователя солнечной энергии в электрическую практически с нулевой топливной составляющей в структуре цены электроэнергии, способностью быстро изменять мощность (от нуля до полной – от 30 секунд до 2 минут) и ADS, как промежуточного умножителя этой солнечной энергии, т.е. производителя делящихся материалов для АЭС, собственной выработки электроэнергии с использованием только ОЯТ. ADS можно рассматривать как безопасный «зеленой» умножитель и преобразователь солнечной энергии, работающей только на топливе, выделенном из ОЯТ.

Продолжены работы по обоснованию схемы исследовательского стенда ADS с учетом возможного каскадного принципа [48-51]. Расчеты проводились с использованием программного комплекса MCNPX и аналитических методик.

Ведутся работы по отработки диагностики мишеней и разработке дополнительных методов контроля первого и второго контуров охлаждения интенсивных импульсных источников нейтронов ИЯИ РАН применимых для возможного прототипа ADS.

13. Измерение содержания радионуклидов природного и техногенного происхождения в почве, воде, растениях и пр. объектах

13.1. Измерение содержания радионуклидов в образцах туфов и кирпичей

Проведено измерение содержания радионуклидов в трех образцах туфов, залегающих на территории КБР, и трех образцов кирпичей, имеющихся в продаже, с помощью гамма-спектрометра на основе сцинтиллятора NaI(Tl) в низкофоновой защите из свинца. Гамма-спектрометр расположен в подвальном помещении ускорительного комплекса КБГУ в совместной ИЯИ РАН и КБГУ Лаборатории астрофизики и физики космических лучей. Во всех образцах обнаружено значимое содержание природных радионуклидов из цепочек распадов U-238 и Th-232, а также K-40. По результатам работы готовится публикация в рецензируемом журнале.

Работа выполнена в сотрудничестве с Кабардино-Балкарским государственным университетом (г. Нальчик).

13.2. Измерение содержания радионуклидов в образцах волос лошадей

Проведено измерение содержания радионуклидов в образцах волос лошадей, содержащихся в конюшнях на равнинной части КБР и на пастбищах в горном районе в Баксанском ущелье КБР. Измерения проводились на низкофоновом гамма-спектрометре на основе сверхчистого германия (HPGe-гамма спектрометр), расположенного в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН. По результатам измерений обнаружено присутствие природных радионуклидов из цепочек распадов U-238 и Th-232, K-40. Кроме того, в образце волос лошади, которая находилась на выпасе на высокогорном пастбище, обнаружено присутствие космогенного изотопа Be-7 и техногенного изотопа Cs-137 на уровне $0,65 \pm 0,19$ и $0,17 \pm 0,05$ Бк/кг. По результатам работы готовится публикация в рецензируемом журнале.

Работа выполнена в сотрудничестве с Кабардино-Балкарским государственным университетом (г. Нальчик).

13.3. Измерение содержания радионуклидов в криоконитах Центрального Кавказа

Ранее выполнено измерение удельной активности природных (K-40, U-235, U-238, Th-232) и антропогенных (Cs-137) радионуклидов в криоконитах ледников Центрального Кавказа. Работа показывает, что активность исследованных природных радионуклидов в криоконитах изученных нами ледников сопоставима с данными по арктическим ледникам, несколько ниже, чем на горе Эльбрус и в Закавказье, и значительно ниже, чем на альпийских ледниках. Исследование показало, что ледники Центрального Кавказа (Цей, Сказка и Безенги) демонстрируют низкие значения удельной активности антропогенного

радионуклида Cs-137 и составляют в среднем от 0,51 Бк/кг (Безенги) до 2,61 Бк/кг (Сказка). Напротив, высокие и очень высокие концентрации этого радионуклида были обнаружены в криоконитах ледников из других регионов, особенно в Альпах, Арктике и Закавказье. Таким образом, наши данные подтверждают результаты предыдущих исследований, проведенных на ледниках Центрального Кавказа, которые показали, что активность природных радионуклидов в криоконитах ледников Центрального Кавказа сопоставима со среднемировыми значениями, в то время как антропогенный радионуклид Cs-137 значительно ниже. Подготовлена и опубликована статья в рецензируемом журнале.

Работа выполнена в сотрудничестве с Институтом экологии горных территорий РАН (г. Нальчик).

13.4. Измерение содержания радионуклидов в сосновой хвое

Ранее проведено измерение содержания радионуклидов природного (примордиального и космогенного) и техногенного происхождения в ассимиляционном аппарате сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*), произрастающей на Западном Кавказе (в пределах Карачаево-Черкесской Республики). В сосновой хвое было обнаружено содержание радиоизотопов бериллия (^{7}Be), калия (^{40}K), тория (^{232}Th), урана (^{238}U) и цезия (^{137}Cs). Была выявлена тесная корреляция содержания ^{7}Be , ^{238}U и ^{137}Cs в образцах сосновой хвои с высотой места произрастания. Подготовлена и опубликована статья в рецензируемом журнале.

Работа выполнена в сотрудничестве с Институтом экологии горных территорий РАН (г. Нальчик).

13.5. Обзор по биологическому воздействию высокоэнергичных мюонов

Подготовлен обзор по биологическому воздействию высокоэнергичных мюонов. В статье описаны и кратко рассмотрены основные виды биологических исследований, связанных с мюонами высоких энергий: радиационная биофизика, выполняемая с помощью мюонных пучков, биологические эффекты вторичного космического излучения и низкого фонового излучения, радиоэкология, связанная с получением космогенных изотопов, астробиология и прикладные исследования. Отсутствие прогресса в этой области связано с технологическими и методологическими ограничениями. Предложено использовать комбинированный экспериментальный подход, используя как глубоко расположенные подземные лаборатории с низким уровнем фонового излучения (отсутствие эффектов), так и высокоэнергетические мюонные пучки (усиление эффектов). Эксперимент BioMuon (Bioμ) предназначен для изучения биологического воздействия высокоэнергетических мюонов на биологические организмы и разработки новых применений этих элементарных частиц. Будут использованы два оборудования – мюонный пучок протонного синхротрона

U-70 (ИХЭП НИЦ "Курчатовский институт", Протвино) и подземная низкофоновая лаборатория глубокого заложения DULB-4900 (Баксанская нейтринная обсерватория, ИЯИ РАН, п. Нейтринно). Модельные организмы будут подвергаться хроническому облучению в низких дозах (мюоны с энергией 2 ± 1 ГэВ) и в условиях низкого фона. Чувствительность и стрессовые реакции модельных организмов, подвергшихся воздействию различных радиационных условий, будут изучаться главным образом с помощью высокочувствительного транскриптомного метода и интерпретироваться с помощью сравнительного транскриптомного анализа. В заключение, систематизация данных свидетельствует о высоком научном интересе к биологическим эффектам, вызываемым мюонами высокой энергии. Мы надеемся, что предложенный экспериментальный подход позволит ученым получить уникальные биофизические данные.

Работа выполнена в сотрудничестве с Объединенным институтом ядерных исследований (г. Дубна).

14. Тестовый низкофоновый сцинтилляционный детектор для контроля содержания радона в воздухе

14.1. Описание монитора радона с низкофоновым сцинтилляционным детектором

Вариации содержания радона в воздухе лабораторного помещения связаны, в первую очередь, с процессами выхода радона из грунта и процессом перемешивания с исходно чистым, но обычно уже загрязнённым атмосферным воздухом. Для изучения особенностей процесса выхода радона из грунта требуется изолировать газящую поверхность и некоторый рабочий, тестовый, объём воздуха от окружающего свободного воздуха и обеспечить условия свободного выхода радона из грунта именно в этот объём.

Обеспечение такого режима предусмотрено в конструкции новой низкофоновой установки, схематический разрез которой приведён на рисунке 32.

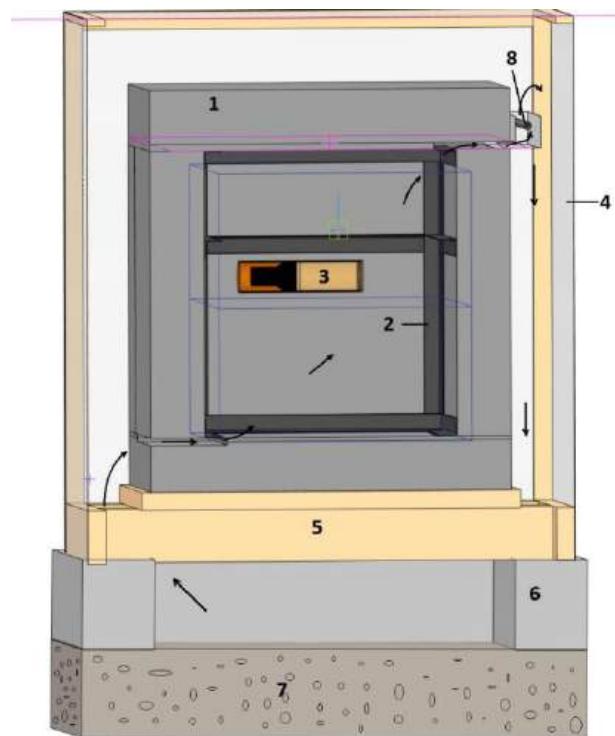


Рисунок 32 – Схематический разрез наземной низкофоновой установки со сцинтилляционным детектором для контроля скорости выхода Rn-222 из грунта. 1.

Свинцовая защита; 2. Стальной каркас; 3. Детектор; 4. Полиэтиленовая пленка; 5. Деревянный помост с каркасом для изолирующего шатра; 6. Бетонный пол; 7. Грунт; 8. Трубка с нагревательным элементом внутри. Стрелками показан маршрут перемещения воздуха в полостях установки

Основным узлом установки является низкофоновая защита (1) с рабочей полостью $67,5 \times 70 \times 75 \text{ см}^3$ и объёмом $\sim 355 \text{ л}$. Стенки защиты толщиной 15 см изготовлены из свинца вокруг стального каркаса (2). В левом нижнем и правом верхнем (по рисунку) углах защиты в вертикальных стенках изготовлены сквозные горизонтальные щели. В центре полости

горизонтально подвешен сцинтилляционный детектор (3) на основе кристалла NaI(Tl) с размерами 80×160 мм. Защита накрыта воздухонепроницаемым шатром из полиэтиленовой плёнки (4), укреплённой на деревянном каркасе с помостом (5). Под установкой в бетонном полу (6) сделано углубление размерами 100×100×10 см до грунта (7). Внутри шатра обеспечена непрерывная вентиляция рабочей полости потоком воздуха, обогащённого радоном, выходящим из грунта. Для этого на наружной стороне верхней щели установлен лоток с помещенным в него маломощным нагревателем на основе светодиодной гирлянды внутри стальной трубы (8). Щели между бетоном и полиэтиленовой плёнкой промазаны высокопрочным kleem. На рисунке 33 представлена фотография установки, находящейся в подвальном помещении лабораторного корпуса БНО ИЯИ РАН.



Рисунок 33 – Фото наземной низкофоновой установки со сцинтилляционным детектором для контроля скорости выхода ^{222}Rn из грунта: 1) свинцовая защита с внутренним стальным каркасом; 2) воздухонепроницаемый полиэтиленовый шатёр; 3) трубка с нагревательным элементом внутри; 4) деревянный помост; 5) высоковольтный источник; 6) компьютер со встроенным анализатором; 7) ящик с цилиндрической воздушной ионизационной камерой (ЦВИК) внутри; 8) емкость с силикагелем; 9) высоковольтный источник ЦВИК; 10) продувочный компрессор с платой ARDUINO; 11) анализатор ЛА-10-12PCI; 12) ноутбук для мониторинга сигналов с ЦВИК

Параллельно с установкой со сцинтилляционным детектором, скорость выхода ^{222}Rn из грунта будет измеряться с помощью цилиндрической воздушной импульсной ионной ионизационной камеры (ЦВИК). Для этого воздух из внешнего объема установки будет прокачиваться через ЦВИК с помощью управляемого платой ARDUINO компрессора.

14.2. Измерение содержания радона в воздухе сцинтиляционным детектором

Установка расположена в цокольном помещении наземного лабораторного корпуса БНО ИЯИ РАН. Сам корпус построен на дне Баксанского ущелья в ~50 м от реки Баксан. Грунт является осадочной породой: песок с камнями. Предварительные измерения начаты 18 апреля 2024 года. На рисунке 34 приведён спектр гамма-фона детектора, накопленный за чуть более 1000 часов и приведённый к одному часу. Если говорить о загрузках, то она составила 4–10 событий в секунду в минимуме и максимуме и в диапазоне энергий от 550 до 3000 кэВ.

Собственный фон детектора, оценённый по результатам измерений в подземной низкофоновой установке с защитой 15 см Pb+10 см Cu, составляет $\sim 1 \text{ с}^{-1}$. При сравнении данных наземных измерений следует учесть, что фон детектора может быть в ~ 4 раза выше за счёт вклада импульсов от космических лучей. Форма спектра соответствует предположению, что источник равномерно распределён по объёму воздуха, как и ожидается для ^{214}Bi , являющегося дочерним продуктом распада ^{222}Rn [51].

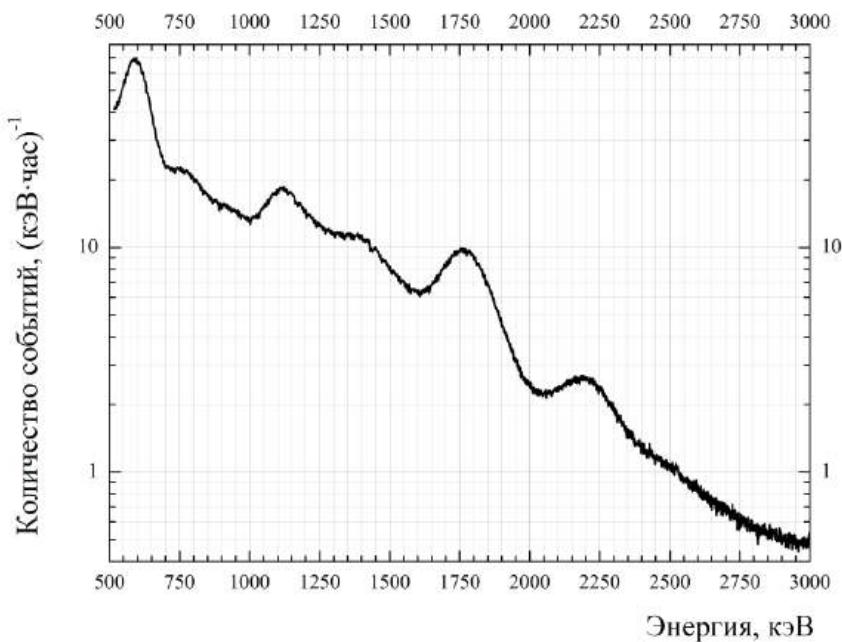


Рисунок 34 – Спектр фона сцинтиляционного детектора с кристаллом NaI(Tl) 80×160 мм, в полости $67,5\times 70\times 75$ см 3 защиты из свинца толщиной 15 см в полуподвале лабораторного корпуса БНО ИЯИ РАН

Для контроля содержания радона в воздухе внутри шатра импульсы от сцинтиляционного детектора регистрируются цифровым осциллографом ЛА-н10-12PCI и в режиме «on-line» обрабатываются. В память компьютера записывается амплитуда импульса и время его появления. Для построения зависимости скорости счёта от времени импульсы с энергией выше 520 кэВ, накопленные за заданный интервал, суммируются. Полученная величина является отдельной точкой при построении графика. На рисунке 35

представлена зависимость от времени последовательного ряда таких значений, накопленных за 1 час в период наблюдений – с 18 июля 2024 по 24 октября 2025 года (чистого времени измерений около 10861 часов).

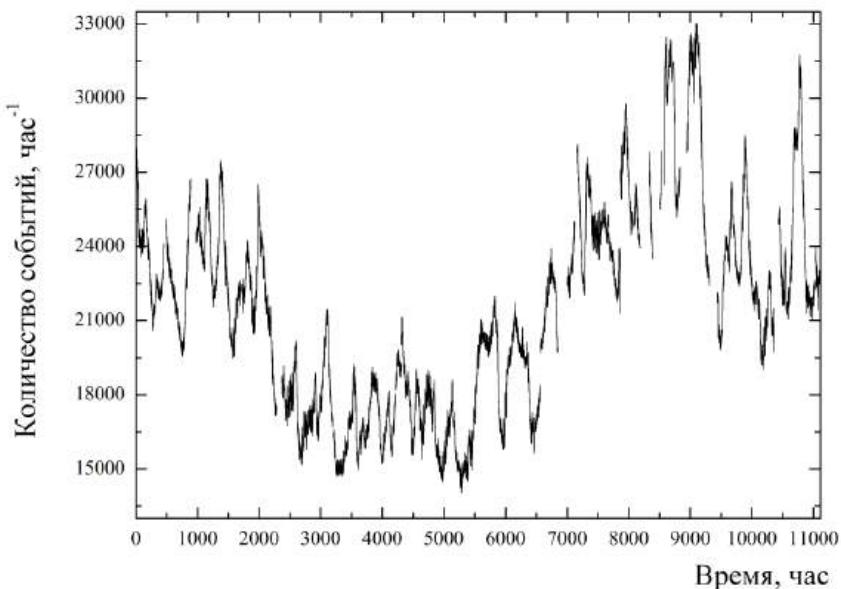


Рисунок 35 – Зависимость от времени скорости счёта низкофонового сцинтилляционного детектора с кристаллом NaI(Tl) 80×160 мм, в полости 67,5×70×75 см³ защиты из свинца толщиной 15 см в полуподвале лаб. корпуса в период 18 июля – 24 октября 2025 года

Из рисунка 35 видно, что на протяжении первых ~ 1500 часов в данных отсутствуют суточные вариации. Это свидетельствует о достаточно высоком качестве герметизации шатра, поскольку в воздухе помещения с установкой суточные вариации должны присутствовать. Наблюдаемые долговременные вариации с периодом ~ 2 недели могут быть связаны с температурой поверхности шатра (температура в помещении), влажностью воздуха внутри шатра или вариациями скорости выхода радона из грунта тестового участка. Для однозначного ответа пока не хватает данных об этих параметрах. На графике наблюдается нарастание амплитуды суточных вариаций скорости счёта с течением времени, что может свидетельствовать о нарушении герметизации места установки шатра на бетоне из-за температурных деформаций пола с наступлением холодного времени года, поскольку помещение не отапливаемое. Одновременно наблюдается снижение на $\sim 25\%$ средней скорости счёта, что также может свидетельствовать о нарушении герметизации шатра, поскольку содержание радона в воздухе помещения должно быть ниже, чем в шатре [51].

После проведения дополнительной герметизации шатра амплитуда суточных вариаций значительно уменьшилась. Это можно наблюдать на графике (рисунок 35), начиная с 7550 часов с момента наблюдений, что соответствует концу мая 2025 года. Так же на графике видна явно выраженная годовая волна с максимумом в летнее и минимумом

в зимнее время. Это обусловлено зависимостью выхода радона из земли от сезонных колебаний температуры окружающей среды. В теплый период года просыхает поверхность земли и открываются почвенные капилляры. По-видимому, процесс выхода радона через эти капилляры является главным источником радона в приземном воздухе.

Для сравнения, ниже приведен, рисунок 36, график зависимости содержания радона в воздухе от времени в подземной низкофоновой камере КАПРИЗ, находящейся в штольне “Главная” БНО ИЯИ на расстоянии 620 м от входа. Измерения проводились с помощью камеры ЦВИК [52]. На графике представлена получившаяся времененная зависимость за интервал с 16 марта 2021 по 11 июля 2022.

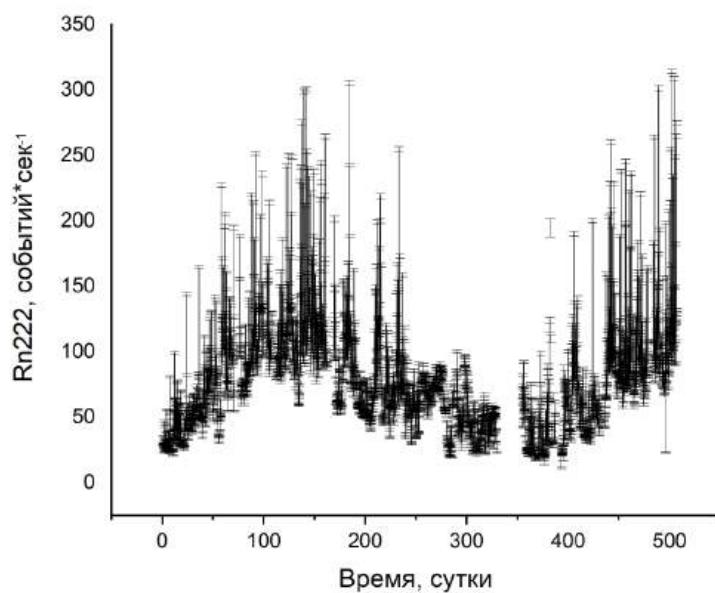


Рисунок 36 – Зависимость от времени содержания ^{222}Rn в воздухе штольни “Главная” на расстоянии 620 м от входа. Начало измерений – 16 марта 2021 г.

Видно, что к концу июня среднее содержание радона в воздухе поднялось в ~ 4 раза, это также обуславливается зависимостью выхода радона из грунта от сезонных колебаний температуры.

15. Исследование взаимосвязи энерговыделения в теле Земли с климатом, а также с длительностью суток в рамках модели Богатая водородом Земля

Проведён независимый анализ данных, полученных на детекторе BOREXINO в ходе эксперимента по изучению естественных потоков низкоэнергетических нейтрино [53]. В анализ были включены события, связанные с распадом изотопа калия-40 в земной коре. В результате это позволило получить значительно лучшее согласие теории с экспериментальными данными по сравнению со случаем отсутствия этого источника. Полученная высокая скорость счёта гео-антинейтрино от калия-40 согласуется с предсказаниями модели Земли – Богатая водородом Земля или Гидридная модель Земли (Hydridic Earth model) и не согласуется с предсказанием, принятой в настоящее время модели Земли – Силикатная Земля. Мы будем использовать сокращение для Hydridic Earth model – НЕ-модель и будем использовать эту модель для интерпретации экспериментальных результатов в физике Земли, не получивших объяснение.

В работе [54] проведено численное моделирование эксперимента BOREXINO, исходя из различных моделей Земли. Показано, что экспериментальные результаты эксперимента BOREXINO могут быть получены только в случае реализации в природе НЕ-модели. Это моделирование подтверждает справедливость НЕ-модели.

Отметим, что большого теплового потока из недр Земли, вызванного полученным в вышеуказанных работах количеством калия-40, достаточно, чтобы объяснить наблюдаемое потепление океанов. Это важный результат, так как он объясняет потепление океанов потоком тепла снизу, а не с верху. Последнее принято Силикатной моделью Земли. Именно нагрев океанов обеспечивает наблюдаемое повышение температуры атмосферы.

НЕ-модель рассматривает новый механизм теплопередачи в Земле – струйный выход горячих протонов из недр Земли, появившихся из-за распада гидридов металлов под мантией. Также она предлагает общую причину наблюдаемого потепления океанов и уменьшения продолжительности дня на Земле. Такой причиной является распад гидридов металлов на поверхности ядра Земли за счёт радиогенного тепла, появление свободного водорода и его дальнейшее распространение через металлическую мантию и кору Земли. Растворение водорода в мантии приводит к её сжатию и уменьшению длительности дня. Затем водород в виде протонов попадает в кору Земли, образует при взаимодействии с веществом коры на глубинах около 10 км различные газы, которые нагревают океан. Сжатие Земли вызывает дополнительный нагрев Земли, также при распаде гидридов выделяется дополнительная энергия, запасённая в гидридах. Итак, всем этим процессам с выделением энергии дают старт распады гидридов.

НЕ-модель предсказывает также наличие цикла охлаждения недр, старт которому даёт расширение металлов, образовавшихся при распаде гидридов. При расширении новых металлов против силы тяжести верхних слоёв Земли, узкий расширяющийся слой охлаждается, и распад гидридов останавливается. Протоны больше не рождаются и покидают металлическую мантию. Мантия при этом расширяется и охлаждается. Наступает цикл охлаждения Земли.

Циклическое расширение и сжатие Земли приводит к циклическому изменению длительности суток.

Сравнение экспериментальных зависимостей от времени температуры океана и атмосферы с изменениями длительности земных суток за длительный период времени показывает сильную взаимосвязь этих процессов: рисунок 37.

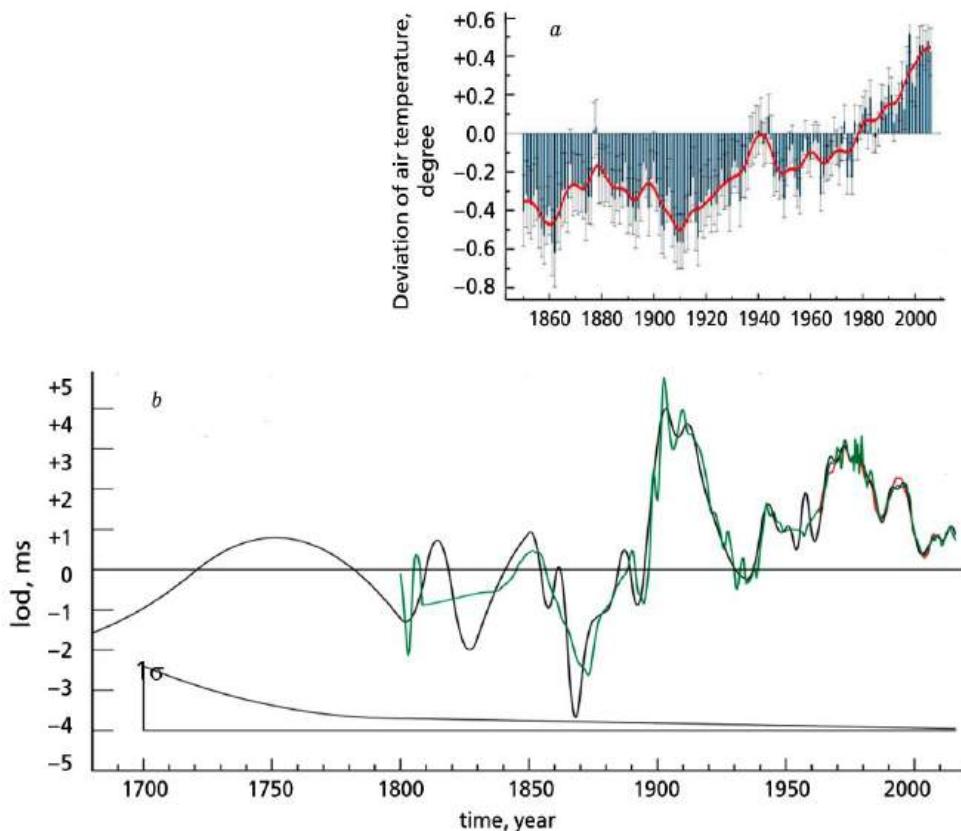


Рисунок 37 – а. Изменение температуры воздуха. б. Изменение длительности земных суток

Была введена и рассматривалась в 2025 году гипотеза о том, что механизм охлаждения недр Земли остановился около 100 лет назад в связи с тем, что стало сложно расширяться новым металлам против возрастающего веса мантии. Можно сделать прогноз, что в течение следующих 100 лет океан нагреется на 0,7 градуса. За это время геофизики должны развить Богатую водородом модель Земли и дать долговременный прогноз развития Земли и климата.

Л.Б. Безруков и В.В. Синёв (ИЯИ РАН) сделали доклад на тему «Общая причина нагрева океанов и уменьшение длительности суток Земли» на конференции «Современная астрономия: наука и образование (к 270 летию МГУ)» в ГАИШ МГУ, 23-25 июня 2025 года. Доклад принят к печати в Moscow University Physics Bulletin 80(7), (2025).

16.Разработка комплекса для удалённого мониторирования параметров среды в подземных лабораториях. Параметры: температура, влажность, давление, плотность углекислого газа, плотности положительно и отрицательно заряженных аэроионов, радона

Разработка комплексов для удаленного мониторирования параметров среды ведется в подземных помещениях ИЯИ РАН Москва, ИЯИ РАН Троицк, БНО ИЯИ РАН и НИИЯФ МГУ с возможностью подключения различных датчиков для разных условий, а также для установления оптимальной конструкции и параметров комплекса.

16.1. Описание измерительного комплекса

Первый универсальный измерительный комплекс был предназначен для измерения в непрерывном режиме основных составляющих параметров атмосферного воздуха: температуры, влажности, атмосферного давления, плотностей аэроионов, уровня СО₂. Комплекс подключается к ноутбуку с выходом в интернет. Его программное обеспечение дает возможность подключения любых датчиков, имеющих аналоговый выход или датчики с цифровым выходом, имеющие библиотеку в системе Ардуино аппаратно-программных средств построения и прототипирования простых систем, моделей и экспериментов в области электроники, автоматики, автоматизации процессов и робототехники, основанная на базе использования микроконтроллеров.

Аппаратная часть комплекса включала в себя:

- датчики температуры, влажности, давления, уровня СО₂, собранный в едином боксе;
- выносной датчик температуры, влажности, давления;
- два высокоточных термокорректируемых счетчика аэроионов, на базе счетчика Сапфир-3М;
- блок микроконтроллеров для обработки сигналов с датчиков.

Программная часть измерительного комплекса объединяла комплекс программ, переводящих сигналы данных от датчиков посредством микроконтроллеров в соответствующие текстовые файлы для их последующей обработки, а также программы, организующих работу системы. Связь аппаратной части комплекса с компьютером осуществляется посредством стандартного соединения через имеющиеся в них стандартные USB разъемы.

Два комплекса, расположенных в НИИЯФ МГУ и в ИЯИ РАН (Москва) записывали данные датчиков температуры (*T*), влажности (*H*) и давления (*P*), расположенных на полу помещения; данные с датчика измерения концентрации углекислого газа (СО₂) и с одного

из модифицированных счетчиков Сапфир-3М (C_{Ion}), измеряющих плотность положительных и отрицательных аэроионов [15].

Частота измерения T [в градусах Цельсия], H [в %], P [в мм рт.ст.] составляет 1 секунду, концентрации CO₂ [в 0,01% или 1×100 ppm] – 5 секунд, плотности аэроионов C_{Ion} [число частиц ×10³ / см³] – 4 секунды.

В дополнение к комплексу в подвале находился радиометр радона и торона, Альфарад (C_{Rn}), измерения производилось раз в 60 минут C_{Rn} [в Бк/м³]. Показания с Альфарада списывались на съемный носитель при непосредственном доступе в подвал.

Комплекс в ИЯИ РАН (Москва) записывали данные с февраля 2024 г. В некоторые периоды времени проводились наладки режимов работы программного обеспечения и различных измерений при изменении местоположения комплекса.

К основным особенностям измерений в подвале концентрации углекислого газа, радона, и плотности аэроионов можно отнести их резкое падение при открывании двери в подвал и медленное нарастание концентрации при закрытии двери.

На рисунке 38 показан пример данных в период с 09.11.2024 по 18.11.2024, отображающихся на экране монитора. Параметры на графике описаны в подписи к рисунку. Провал в середине графика – это открывание двери в подвал, в результате которого происходил воздухообмен между подвалом и наружной атмосферой. Регулярные выбросы на временных рядах влажности, температуры и плотности отрицательных аэроионов – следствие работы осушителя в подвале.

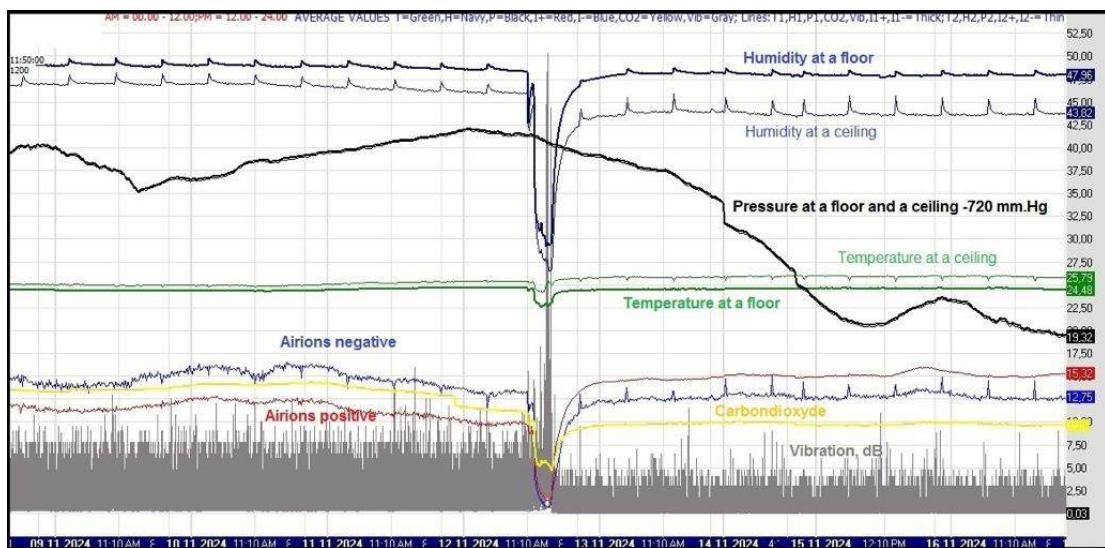


Рисунок 38 – Пример временных рядов в режиме мониторирования в период с 09.11.2024 по 18.11.2024 в ИЯИ РАН, Москва. Концентрация углекислого газа – желтая кривая, температура с двух датчиков – зеленые, толстая и тонкая кривые. Влажность с двух датчиков (в верхней части графика) – синие, толстая и тонкая кривые. Плотность аэроионов, положительных – красная кривая, отрицательных – синяя кривая. Давление – черная кривая. Уровень вибрации – серая гистограмма (внизу графика)

В 2025 году разрабатывался измеритель вибрации, который был включен в модернизированный комплекс ИЯИ РАН в подземном помещении в Москве. Структурная схема, модернизированного комплекса показана на рисунке 39.



Рисунок 39 – Структурная схема измерительного комплекса

16.2. Измеритель вибрации

Измеритель вибрации предназначен для измерения уровня вибрации в помещении на базе электромагнитного динамика с переделанным диффузором. Измеряемая величина – вибрационная скорость, выраженная в децибеллах относительно уровня чувствительности датчика. Принципиальная электрическая схема измерителя вибрации представлена на рисунке 40.

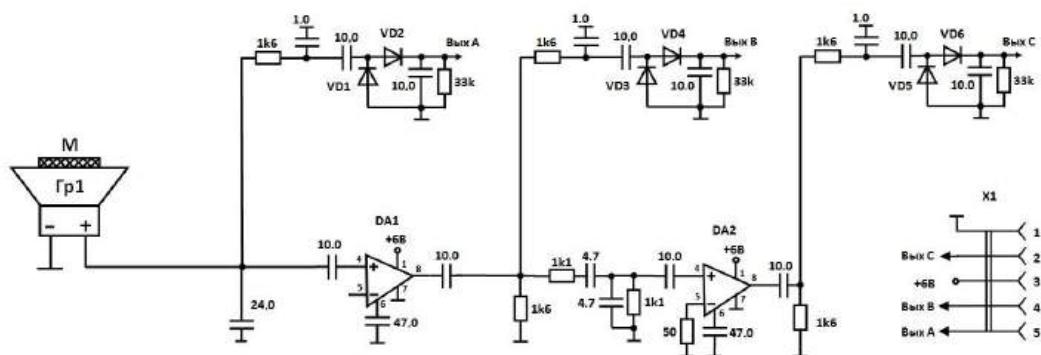


Рисунок 40 – Принципиальная электрическая схема измерителя вибрации

Чувствительным элементом детектора является динамик, чувствительностью 100 дБ/Вт, внутренним сопротивлением 32 Ом, частотным диапазоном 20Гц – 20кГц, с приклеенным к диффузору грузом массой 4 г.

Сигналы с выходов детектора подаются через аудио шлейф с разъемами стандарта DIN5 на входы АЦП контроллера, расположенного в блоке контроллеров.

Рабочий диапазон измерения вибраций (динамический диапазон) составляет 75 дБ (в диапазоне частот от 30 Гц до 1 кГц, с неравномерностью АЧХ ± 10 дБ).

Программа для разработанного нами измерителя вибрации с использованием АЦП ADS1262 представляет собой два библиотечных файла, включающих файл заголовка, исполняющий файл и специальную программу. Библиотечные файлы созданы для реализации всех функций и возможностей, заложенных в очень чувствительном и высокоточном АЦП ADS1262. Файл заголовка содержат объявления функций, классов, структур и констант. Ее задача – сделать доступным интерфейс библиотеки, чтобы другие части программы могли понимать, какие методы и переменные существуют и как ими пользоваться. Исполняющий файл хранит всю реализацию и содержит тела функций, классы и все вспомогательные структуры данных, необходимые для функционирования библиотеки. В этом файле прописываются алгоритмы и логика работы методов. Кроме этого, она содержит очень подробное описание заложенных функций и примерами их использования. Специальная программа принимает данные по выборкам с АЦП, обрабатывает их и выдает на компьютер ежесекундные данные по максимальному размаху напряжения на выходе с датчика виброметра и задаваемым пользователем количеством максимальных пиков спектра, ранжированных по частоте.

17.Поиск вариаций потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории НЛГЗ-4900 в БНО ИЯИ РАН, связанных с солнечными и лунными приливными эффектами, метеорологическими условиями, сейсмической активностью в регионе

Поток нейтронов в подземных лабораториях является критическим фактором при оценке фона в низкофоновых экспериментах, таких как эксперименты по поиску двойного бета распада, поиск темной материи и т. д. Одним из возможных источников тепловых нейтронов является естественный распад радионуклидов, содержащихся в гнейсе (порода стен подземной камеры).

Для исследования вариаций потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900 используется установка, состоящая из четырех детекторов тепловых нейтронов. Каждый детектор представляет собой бак в форме параллелепипеда ($70 \times 70 \times 30$ см), просматриваемого через окно фотоумножителем ФЭУ-49Б. На дне бака уложен тонкий сцинтиллятор толщиной 0,7 мм и площадью $0,36 \text{ м}^2$. Сцинтиллятор представляет собой сплав двух компонент ZnS(Ag) и ${}^6\text{LiF}$ в соотношении 1/3, при этом, ZnS(Ag) служит сцинтиллятором, а ${}^6\text{Li}$ — является изотопом, на котором происходит захват нейтрона:



Для отслеживания изменений условий окружающей среды внутри бокса, где расположены сцинтилляционные детекторы, находится регистрирующая аппаратура для записи температуры, влажности и давления атмосферного воздуха.

В 2025 году рассматривалась задача о возможной регистрации экзотических гипотетических частиц, таких как элементарные чёрные дыры (максимоны). Эта концепция была введена Моисеем Александровичем Марковым, который предположил, что существуют ультрамассивные стабильные частицы с массой порядка планковской, являющиеся по сути квантовыми чёрными дырами. Максимон — это квантовый объект (частица) с массой, равной планковской массе ($\sim 10^{-5}$ г), которая является предельной для элементарной частицы в рамках квантовой теории гравитации. Это самая тяжелая возможная элементарная частица. М. А. Марков отождествил максимон с минимально возможной черной дырой, радиус которой равен планковской длине. Таким образом, это не черная дыра в классическом астрофизическом понимании, а квантово-гравитационный объект. В отличие от черных дыр меньшей массы, которые, согласно гипотезе Хокинга, должны испаряться, максимоны (и черные дыры планковской массы) рассматривались Марковым как стабильные или чрезвычайно долгоживущие объекты. Это делает их

потенциальными кандидатами на роль частиц темной материи. Будучи ультрарелятивистскими и обладая огромной массой, такие частицы должны были бы обладать колоссальной ионизирующей способностью.

Эти ультрамассивные частицы могут пролетать через вертикально установленные детекторы, входящие в состав экспериментальной установки. Например, над третьим детектором находится первый, а над четвёртым – второй. Время пролёта фотона между первым и третьим сцинтилляторами составляет $2,4 \times 10^{-9}$ с, а между вторым и четвёртым – $2,5 \times 10^{-9}$ с. Предполагается, что данные ультрарелятивистские частицы будут проходить через сборку детекторов практически вертикально. Из-за чрезвычайно малого времени пролёта между сцинтилляторами должны фиксироваться одновременные события на детекторах 1–3 или 2–4. В настоящее время разрабатывается алгоритм отбора событий-кандидатов, которые могут соответствовать сигналам от релятивистских частиц. Тестирование данного алгоритма предполагается провести на отборе событий, соответствующих высокоэнергетическим мюонам, проходящим толщу горы (4900 м в.э.) над лабораторией НЛГЗ-4900.

Данный алгоритм заключается в следующем. Рассмотрим рисунок 41. На этом рисунке изображён прямоугольный параллелепипед ABCDA'B'C'D', где ABCD и A'B'C'D' — верхний и нижний сцинтилляторы, AB=BC= 60 см, AA'= 70 см. Точка O — центр пересечения диагоналей данного параллелепипеда.

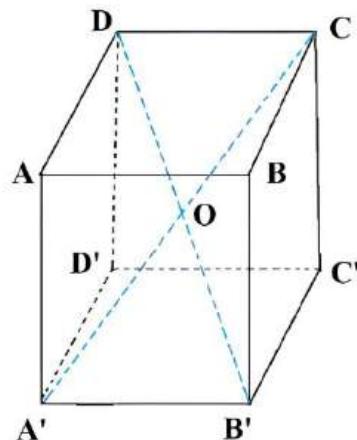


Рисунок 41 – Геометрическое распределение точек траекторий и пересечения высокоэнергетических частиц со сцинтилляционными плоскостями ZnS(Ag)⁶LiF

В случае одновременной регистрации сигнала двумя сцинтилляторами траектория ультрарелятивистской частицы через двойной детектор может быть аппроксимирована отрезком прямой. Допустимые траектории ограничены телесным углом при вершине пирамиды OABCD. Расчёт данного угла методом сферических треугольников дает значение $\Omega = 1,65$ ср.

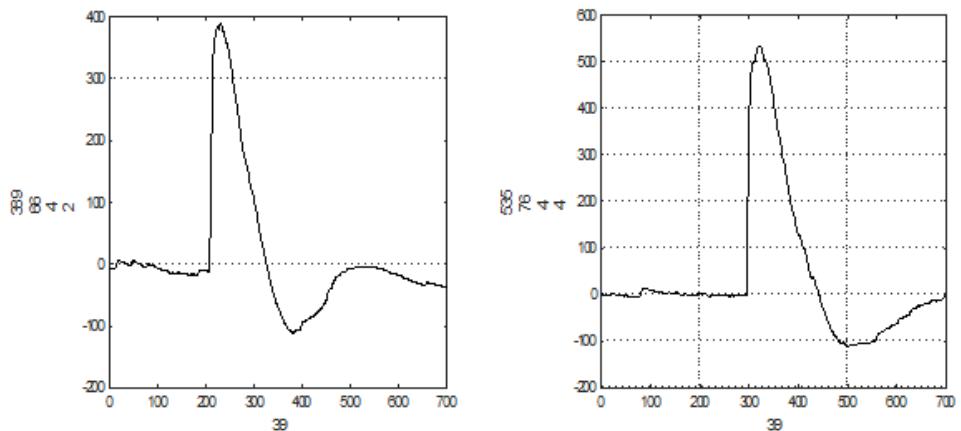


Рисунок 42 – Пример сигналов вертикально расположенных сцинтилляционных детектора на мюон, прошедший через них

На рисунке 42 показаны сигналы вертикально расположенных сцинтилляционных детекторов (2-й и 4-й детекторы), вызванные мюоном, прошедшим через них. У левого импульса амплитуда 389 единиц, у правого – 535. Для сравнения, на рисунке 43, изображён стандартный сигнал, полученный от взаимодействия теплового нейтрона с ${}^6\text{Li}$ в сцинтилляторе, с амплитудой импульса 700 единиц. У сигналов, полученных при детектировании нейtronов, амплитуды выше, чем у тех импульсов, которые получены при прохождении мюонов. Некоторое количество мюонных событий было потеряно на этапе отбора, так как амплитуда их импульсов оказывалась ниже порога разделения с фоновыми сигналами от аппаратных пробоев.

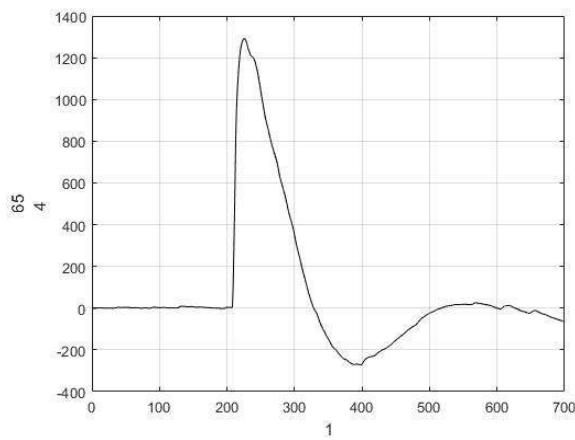


Рисунок 43 – Сигнал от взаимодействия теплового нейтрона с атомом ${}^7\text{Li}$

За время, выбранное для анализа – 3503 дня, в перерасчёте на один спаренный детектор, событий, при которых мюон, пройдя верхний сцинтиллятор одного спаренного детектора, попадал на нижний сцинтиллятор другого, зарегистрировано не было, что говорит о почти вертикальных траекториях мюонов, достигших глубины нахождения установки (4900 м в.э.).

В ходе работы была подтверждена работоспособность методики детектирования с помощью спаренных сцинтилляторов, которая позволяет регистрировать как мюоны, проходящие сквозь толщу грунта над подземной лабораторией НЛГЗ-4900, так и частицы с необычно высокой ионизацией. В результате измерений в условиях низкофоновой камеры был получен верхний предел на поток экзотических ультраквантитивистских частиц с ионизацией выше, чем у мюонов: $J < 7,0 \times 10^{-8} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. На основе этих данных ведётся подготовка публикации.

18. Использование антинейтринного излучения из ядерного реактора для диагностики процессов, протекающих в активной зоне. Исследование формы всех спектров антинейтрино делящихся изотопов, составляющих спектр ядерного реактора

Расчетный спектр антинейтрино не описывает в полной мере экспериментально полученный. Это может быть связано с неточностью базы данных по спектрам осколков деления.

Если проанализировать имеющуюся базу данных, то окажется, что информация не обо всех осколках достоверна. Из более чем 1000 осколков примерно для трети имеется информация о схемах распада, которая достоверно известна. Примерно для одной трети осколков нет практически никакой информации, кроме энергии бета-распада Q_β и оцененного периода полураспада. Для оставшейся трети осколков информация является оцененной на базе известных закономерностей ядерной физики. Эта информация не может считаться достоверной, пока она не проверена экспериментально.

Были проведены расчеты спектров антинейтрино, производимых осколками тяжелых изотопов, входящих в ядерное топливо [55]. Расчет сравнивался с экспериментальным спектром антинейтрино, измеренным в эксперименте Double Chooz. Вариация формы спектра антинейтрино от индивидуальных осколков проводилась при помощи силовой функции, которая описывала вероятности гипотетических бета-переходов у неизвестных осколков, с целью получения наилучшего согласия с экспериментальным спектром антинейтрино. Аналогичная процедура была ранее проделана с данными более раннего эксперимента в Ровно.

Для каждого неизвестного или оцененного осколка подбиралась силовая функция, улучшающая значение функционала

$$\chi^2 = \sum_{k=5,8,9,1} \sum_{i=1,30} \left(\frac{y_{i,k}^{exp} - y_{i,k}^{calc}}{\sigma_{i,k}^{exp}} \right)^2, \quad (17)$$

где $y_{i,k}^{exp}$ – экспериментальный спектр антинейтрино, $y_{i,k}^{calc}$ – расчетный спектр, $\sigma_{i,k}^{exp}$ – погрешность экспериментального спектра. Индекс k пробегает по изотопам (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu), а индекс i – по бинам энергии спектра. Улучшение означает уменьшение величины χ^2 (17).

Полученные сечения расчетных спектров дают сечения реакции ОБР меньше по величине, чем сечения, полученные со стандартной базой осколков деления. Зато среднее сечение, рассчитанное для состава топлива эксперимента Double Chooz $\sigma_f = 5,70 \times 10^{-43}$ см²/деление оказывается немного меньше экспериментального сечения, полученного в

коллаборации Double Chooz [56] $\sigma_f = (5,71 \pm 0,06) \times 10^{-43}$ см²/деление (примерно на 0,18%). Разница в сечении может объясняться не учетом излучения от бассейнов-отстойников с отработанным топливом. Добавка в сечение может составлять от 0,2 до 1% в зависимости от момента времени измерения и, таким образом, можно считать, полученные спектры удовлетворительно описывают экспериментальное сечение в пределах погрешностей измерения и расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты, которые были доложены на крупных конференциях и опубликованы в 2025 году в ведущих научных журналах.

1. Задача «Модернизация генератора рубидия-82 и изучение режимов его эксплуатации»

Получены расчетные значения максимального объема кондиционного элюата из генератора (стандартная колонка) при различном содержании Ca^{2+} в элюенте (0,9% NaCl) для генераторов рубидия-82, изготовленных с использованием радиоактивного сырья (солянокислый раствор хлорида стронция-82).

Оценена относительная селективность катионов щелочноземельных металлов, что позволяет уточнить требования к составу растворов хлорида стронция-82 и элюента повысить производительность и надежность генераторов рубидия-82.

Установлено, что при диагностике методом позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) с применением генераторов рубидия-82 недопустимо использовать элюент (0,9% NaCl), содержащий аскорбиновую кислоту.

2. Задача «Получение натрия-22 с целью получения радиоактивных источников для научных исследований, промышленности и медицины»

Изготовлена и апробирована разработанная ранее усовершенствованную алюминиевая сборка, состоящая из 10 мишеней. Конструкция составной мишени обеспечивает более эффективное получение изотопа натрий-22 при облучении пучком протонов с энергией до 160 МэВ. Мишень была облучена протонами на Стенде облучения ИЯИ РАН с общим интегралом 9303 мА·ч, теоретический выход натрия-22 составил 180 мКи, примесь цинка-65 не более 1,5% от активности продукта.

3. Задача «Разработка циркулирующего $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора для прямого синтеза меченых соединений»

В отчетный период исследована связывание висмута с хелатором H₄DOTA в среде сшитого декстрана при различных условиях элюирования, таких как концентрация хелатора и скорость элюирования, в том числе при нагревании колонки (60-90 °C). Затем исследовано мечение конъюгата DOTA-Substance P для прямого получения лекарственного радиофармацевтического препарата (РФЛП) в среде сшитого декстрана. Данный РФЛП показал свою высокую эффективность для лечения различных видов глиомы.

При концентрации пептида 50 мкг/мл выход радиоиммуноконъюгата составил 85 ± 4%. Полученный продукт имел радиохимическую чистоту 98,0 ± 2,5%. Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными в статических условиях.

4. Задача «Изучение экстракционных и хроматографических методов разделения Ti(IV) и Sc(III) для разработки генераторных схем получения ^{44}Sc »

Для поиска наиболее подходящих условий разделения генераторной пары $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ исследована жидкость-жидкостная экстракция этих радионуклидов из азотно- и солянокислых растворов растворами трибутилфосфата (ТБФ) и три-н-октилфосфиноксида (ТОФО). Полученные результаты сопоставлены с поведением данных изотопов на носителях, пропитанных теми же экстрагентами (смолами TBP resin и TK200 resin), чтобы определить наиболее эффективные схемы разделения и способы улучшения срока службы генераторной системы.

Полученные зависимости коэффициентов распределения K_d для экстракционно-хроматографических смол коррелируют с таковыми для соответствующих экстрагентов. Наибольшим потенциалом для разделения в формате экстракционной хроматографии обладает система TK200 – 3 М HCl.

5. Задача «Подготовка и планирование конформного облучения биологических объектов в ходе радиобиологических исследований»

Была решена задача реализации коллиматора полного поглощения, который обеспечивает резкий спад профиля дозы, минимизируя при этом вклад вторичных нейронов в дозу облучения и радиационную обстановку в процедурной КПТ. Для реализации задачи использовался комбинированный подход в изготовлении колирующего устройства: основная, поглощающая секция изготовлена из плексигласа толщиной 160 мм для полной остановки протонов в этой области, а вставка в центральное отверстие коллиматора, формирующего конечную апертуру, изготовлена из медной трубы с толщиной стенки 1 мм. Этого достаточно для формирования чётких границ дозового профиля, сопоставимых с использованием исключительно медного коллиматора. Полученные в ходе моделирования результаты позволили конформно облучить живые модели рекордной мощностью дозы.

6. Задача «Оценка вклада нейтронной составляющей в дозу при протонной терапии»

В отчетном году была проведена численная оценка эффективной дозы нейтронного излучения, образующегося в результате облучения мишени протонами с использованием метода пассивного рассеяния. Полученные значения качественно согласуются с результатами предыдущих исследований. Эффективная доза нейтронного излучения в процедурной помещении КПТ в ходе облучения лежит в диапазоне 0,1 до 18,4 мЗв/Гр. Больше всего вторичных нейтронов рождается при прохождении гребенчатого фильтра, модулирующего энергетический спектр протонов с начальной энергией 150 МэВ. Также вторичные нейтроны в значительном количестве рождаются непосредственно в мишени,

что приводит к заметному вкладу в результирующую дозу при протонной терапии с формированием терапевтического пучка методом пассивного рассеяния. При облучении мишени в малом водном фантоме вклад в дозу нейтронного излучения по оценке составляет 1,7 %, при конформном облучении головы лабораторного животного вклад в дозу примерно равняется 0,4%. Внесение замедлителя и коллиматора для локального облучения опухоли малых размеров существенно увеличивает эффективную дозу нейтронного излучения во всех частях процедурной КПТ.

7. Задача «Облучение и анализ реакции биологических объектов»

Была изучена зависимость реакции клеток и живых организмов от мощности дозы \dot{D} в самом широком диапазоне: в обычном конвенциональном режиме при $\dot{D} < 1 \text{ Гр/с}$, в режиме FLASH при $\dot{D} \sim 10^2 \text{ Гр/с}$ и в режиме SPLASH при $\dot{D} > 10^4 \text{ Гр/с}$. Анализ реакции клеток показал, что спустя 24 часа в стандартном и одноимпульсном режиме облучения SPLASH обнаруживалась тенденция повышения доли апоптотических клеток НТ-29 по сравнению с конвенциональным режимом. Во всех режимах через 48 часов после облучения наблюдался заметный уровень некроза этих клеток. Также были обнаружены параллельные тренды в уровне репликации ДНК у клеток НТ-29 в течение 120 часов пострадиационного периода. Это свидетельствует о возможности усиления фланш-эффекта в режимах облучения протонами, доступных на ускорителе ИЯИ РАН. Было также проведено тестовое облучение животных (крыс линии Вистар) с подсаженной опухолью глиобластомы, результаты которого будут использованы в последующих экспериментах.

8. Задача «Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах»

Псевдомагнитные поля в нанографитовых пленках

Визуализация псевдомагнитного поля в нанографитовых пленках с помощью оптического излучения с уровней Ландау существенно упрощает детектирование магнитного поля по сравнению с предложением авторов [1–2], которые использовали сканирующий тунNELНЫЙ микроскоп при температуре 7,5 К для визуализации уровней Ландау. В нашем случае измерения оптического излучения с уровнями Ландау проводились с помощью фотодиода при комнатной температуре. В новой фазе исследований в 2026 г. данные по псевдомагнитным полям в нанографитовой пленке во время переключения проводимости будут проверены экспериментальными измерениями.

9. Задача «Разработка перспективных методов детектирования нейтронов и протонов»

Монитор нейтронного потока для реактора ПИК

В 2025 году проводилась доработка газового радиохимического монитора нейтронного потока для реактора ПИК. Особенность такого монитора состоит в том, что он должен регистрировать рекордный нейтронный поток с плотностью до 10^{15} н/см²/сек в очень небольшом по габаритам экспериментальном канале диаметром 100 мм реактора ПИК. По итогам работы была написана статья «Радиохимический монитор нейтронов для высокопоточных ядерных установок» и опубликована в журнале «Инноватика и экспертиза». 2025, выпуск 1(39) стр.169-176.

10. Задача «Комплексные испытания радиационно-защитных материалов»

Безопасные испытания материала СИЗ ионизирующим излучением выполнены с учётом опыта контроля качества радиационно-защитных материалов, проводимых с использованием источников, активность которых соизмерима с активностью фона (см. работы [39-42]), с перспективой аттестации данного способа и создания испытательной лаборатории.

Имитация радиоактивного загрязнения для оценки дезактивируемости СИЗ выполнена на основе анализа достижений в области военного дела с целью обеспечить предприятие, выпускающие мирную продукцию, безопасным и экономичным способом оценки дезактивируемости материалов. В итоге 18 ноября 2025 года по представленной в ФИПС заявке (см. работу [44]) вынесено решение о выдаче Патента на изобретение. Это открывает путь для дальнейшего развития прикладных исследований в данном направлении.

На XII конференции РЗРБ-2025 федерального уровня представлен доклад о прикладных исследованиях, проведённых при ведущем научном сопровождении ИЯИ РАН, в результате которых в России впервые в мире создана отрасль промышленности по производству аварийной радиационно-защитной одежды для работы в экстремальных ситуациях.

11. Задача «Определение элементного состава и структуры композитных материалов методами активационного анализа и резонансной флуоресценции на тормозном излучении электронного ускорителя ЛУЭ-8»

В ходе проведённого исследования изучалась возможность анализа элементного состава, структуры и функциональных свойств новых композитных материалов. Для целей такого анализа образец, содержащий композитный материал должен облучаться тормозными гамма-квантами, что приводит к образованию изомерных состояний

содержащихся в образце ядер атомов. В работе применялись спектрометрические и дозиметрические методы измерения излучения активируемых изотопов и изомеров методами активационного анализа и резонансной флуоресценции.

Были проведены радиометрические измерения внутри защитного контейнера, показавшие наличие активационного излучения от распада радионуклидов из фотоядерной реакции. После отключения пучка ускорителя происходит резкое снижение фона тормозного и рассеянного излучения, но остается распределенное во времени излучение от активированных радионуклидов. Характеристики этого излучения могут быть определены по временной зависимости наведенной активности образовавшихся радионуклидов. Можно сделать вывод, что при помощи аппроксимации распределения излучения от нескольких радионуклидов после окончания активации можно определить элементный состав композитных материалов.

В процессе облучения тормозным излучением образцов индия и кадмия измерены временные распределения активности изомеров Cd и In и энергетические спектры гаммаизлучения изомеров с помощью сцинтилляционного спектрометра на основе NaI(Tl). По измеренным спектрам от активированных образцов были определены скорости счета в пиках спектра, соответствующих энергиям распада изомеров. По ним могут быть рассчитаны элементный состав композитного материала, содержащего изотопы индия и кадмия. Данный результат позволяет предложить новый метод определения элементного состава композитов по анализу временного распределения активационного излучения.

12. Задача «Определение возможного места ADS в атомной энергетике в сравнении с быстрыми реакторами и гибридными термоядерными реакторами и трансмутация минорных актиноидов. Разработка каскадной подкритической сборки, с разделительной системой, обеспечивающей одностороннюю связь между двумя ее составляющими, которая может быть использована в энергетических ADS в условиях долговременной работы»

Задача выполнена с использованием программных комплексов MCNPX, аналитических и инженерных расчетов. Результаты могут быть использованы для возможных оценок путей развития ядерной энергетики так и для дальнейшего развития нейтронного комплекса ИЯИ РАН и ADS.

13. Задача «Измерение содержания радионуклидов природного и техногенного происхождения в почве, воде, растениях и пр. объектах»

Проведен анализ данных по измерению содержания радионуклидов в различных образца, полученных в предыдущие периоды (хвоя, криокониты). Проведены новые измерения с новыми образцами (туф, кирпич, конский волос). По результатам измерений,

в образцах не выявлено сверхвысокого содержания радионуклидов. Однако выявлено некоторое содержание техногенного Cs-137, являющегося продуктом деления урана и трансурановых элементов.

14. Задача «Тестовый низкофоновый сцинтилляционный детектор для контроля содержания радона в воздухе»

Подтверждена возможность использования наземной низкофоновой установки в составе низкофоновой защиты со свинцовыми стенками толщиной 15 см, с рабочей полостью $67,5 \times 70 \times 75$ см³ (объём ~355 л), в центре которой горизонтально подвешен сцинтилляционный детектор на основе кристалла NaI(Tl) с размерами 80×160 мм в качестве монитора γ -излучения от распада ^{214}Bi , являющегося дочерним продуктом распада ^{222}Rn , содержащегося в воздухе рабочей полости. Планируются измерения содержания радона в воздухе внутри шатра с помощью ионной камеры ЦВИК параллельно с измерениями на сцинтилляционном детекторе. В целом проверенная методика регистрации в режиме мониторинга γ -излучения от распада ^{214}Bi , являющегося дочерним продуктом распада ^{222}Rn , представляется перспективной для создания поста автоматического контроля содержания радона в воздухе. Такой пост может быть весьма полезен для предупреждения о возникновении внутренних напряжений в коре Земли, приводящих к интенсификации выхода радона из грунта, в местах проживания людей, где возможны землетрясения [57].

15. Задача «Исследование взаимосвязи энерговыделения в теле Земли с климатом, а также с длительностью суток в рамках модели Богатая водородом Земля»

Предшествующие исследования данных эксперимента Борексино показали, что введение нового источника гео-антинейтрино от распада изотопа ^{40}K позволяет лучше объяснить полученные данные. При этом определился поток этих гео-антинейтрино. Он оказался большим и равным потоку, который предсказывает модель Богатая водородом Земля. Поэтому актуально исследовать взаимосвязь энерговыделения в теле Земли с климатом, а также с длительностью суток в рамках этой модели Земли. Отметим, что в рамках стандартной модели Земли объяснение наблюдаемой взаимосвязи быстрого потепления климата с уменьшением длительности суток встречает трудности.

Была введена и рассматривалась в 2025 году гипотеза о том, что механизм охлаждения недр Земли остановился около 100 лет назад в связи с тем, что стало сложно расширяться новым металлам против возрастающего веса мантии.

Рассмотрение энергетики недр Земли в рамках модели Богатая водородом земля показывает несостоятельность утверждения о влиянии деятельности человека на климат.

16. Задача «Разработка комплекса для удалённого мониторирования параметров среды в подземных лабораториях. Параметры: температура, влажность, давление, плотность углекислого газа, плотности положительно и отрицательно заряженных аэроионов, радона»

Разработанный в ИЯИ РАН автономный комплекс позволяет измерять физические параметры окружающей среды в подземных помещениях, такие как температура окружающего воздуха, влажность, атмосферное давление, уровень CO₂, концентрации аэроионов отрицательной и положительной полярности, уровень вибрации. Измерение уровня CO₂ вместе с вибрацией, в различных частотных диапазонах, позволяет контролировать нарушения земной коры в дальней и ближней зонах и прогнозировать возможные землетрясения. Подземные газы, к которым относятся CO₂, водяной пар и радон является основным продуктом газообразования в сейсмоопасных зонах и могут быть предвестником землетрясений.

17. Задача «Поиск вариаций потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории НЛГЗ-4900 в БНО ИЯИ РАН, связанных с солнечными и лунными приливными эффектами, метеорологическими условиями, сейсмической активностью в регионе»

Основной задачей исследований 2025 года был поиск экзотических гипотетических частиц, в частности, элементарных чёрных дыр (максимонов). Эта концепция была введена Моисеем Александровичем Марковым, который предположил, что существуют ультрамассивные стабильные частицы с массой порядка планковской, являющиеся по сути квантовыми чёрными дырами. Считается, что такие ультраквантитативистские частицы будут пролетать через установку по нормали, и из-за их чудовищной массы и скорости оставлять специфический сигнал с очень высокой ионизацией практически одновременно в парах детекторов 1–3 или 2–4. Для выделения подобных событий в настоящее время создаётся специализированный алгоритм.

В ходе работы была подтверждена работоспособность методики детектирования с помощью спаренных сцинтиляторов, которая позволяет регистрировать как мюоны, проходящие сквозь толщу грунта над подземной лабораторией НЛГЗ-4900, так и частицы с необычно высокой ионизацией. В результате измерений в условиях низкофоновой камеры был получен верхний предел на поток экзотических ультраквантитативистских частиц с ионизацией выше, чем у мюонов: $J < 7,0 \times 10^{-8} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. На основе этих данных ведётся подготовка публикации.

18. Задача «Использование антинейтринного излучения из ядерного реактора для диагностики процессов, протекающих в активной зоне. Исследование формы всех спектров антинейтрино делящихся изотопов, составляющих спектр ядерного реактора»

Был проведен расчет спектров антинейтрино с одновременной подгонкой к экспериментальным спектрам. Получено хорошее согласие экспериментальных спектров антинейтрино делящихся изотопов с расчетными.

Сечение реакции ОБР, полученное на основе расчетных спектров при составе активной зоны реактора Double Chooz $\sigma_f = 5,70 \times 10^{-43}$ см²/деление, хорошо совпадает с экспериментальным сечением Double Chooz $\sigma_f = (5,71 \pm 0,06) \times 10^{-43}$ см²/деление.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Guinea F., Katsnelson M. I., Geim A. K. Energy gaps and a zero-field quantum Hall effect in graphene by strain engineering / Nature Physics. – 2010. – 6(1). – P. 30-33.
2. Strain-induced pseudo-magnetic fields greater than 300 Tesla in graphene nanobubbles / Levy N. [et al.] // Science. – 2010. – 329(5991). – P. 544-547.
3. Сочетанные радиационные поражения / Гогин Е.Е. [и др.] // М.: ППО «Известия», 2000 – 240 с.
4. Завод специального оборудования АО «ПТС». – URL: <https://pto-pts.ru>.
5. ГОСТ Р 53264-2019. Техника пожарная. Одежда пожарного специальная защитная. Общие технические требования. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2019. – 42. – с. 94.
6. Savran D., Aumann T., Zilges A. Experimental studies of the Pygmy Dipole Resonance // Prog. Part. Nucl. Phys. – 2013. – V. 70. – P. 210-245.
7. Photoexcitation of ^{76}Ge / Schwengner R. [et al.] // Phys. Rev. C. – 2022. – V. 105. – P. 024303(1-13).
8. Капитонов И.М. Фотоядерное наследие группы Б.С. Ишханова // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2023. – № 3. – С. 23302011(1-28).
9. Бурмистров Ю.М., Скоркин В.М. Исследование рентгеновского излучения в композитных материалах с металлами при облучении нейтронами и фотонами // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – № 3. – С. 32-36.
10. Возбуждение изомерных состояний $^{111\text{m}}\text{Cd}$, $^{113\text{m}}\text{In}$, $^{115\text{m}}\text{In}$ фотонами с энергией до 8 МэВ / Недорезов В.Г. [и др.] // Ядерная физика. – 2017. – № 5. – С. 423-426.
11. Фотовозбуждение ядер Cd и In реальными и виртуальными фотонами в области 4-9 МэВ / Зуев С.В. [и др.] // ЭЧАЯ. – 2019. – № 5. – С. 739-744.
12. Пономарев В.Н., Солодухов Г.В., Недорезов В.Г. Ускорительный комплекс на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5РВ ИЯИ РАН для фундаментальных исследований // Изв. РАН. Сер. физ. – 2019. – № 9. – С. 1270-1272.
13. High-resolution ion pulse ionization chamber with air filling for the ^{222}Rn decays detection / Gavrilyuk Yu.M. [et al.] // Nucl. Instrum. And Meth. – 2015. – Vol. A801. – P. 27-33.
14. Боков В.Н., Гутшабаш Е.Ш., Потиха Л.З. Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 18. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГГМУ, 2011 – 250 с.

15. Наблюдение избытка положительных аэроионов в подземных полостях / Bezrukov L. B. [et al.] // Геомагнетизм и Аэрономия. – 2022 – Т. 62. – С. 755 – 768.
16. Стенькин Ю.В. Природные потоки тепловых нейтронов и геофизика // Ядерная физика. – 2022. – Т. 85. № 6. – С. 448-453.
17. Связь вариации потока тепловых нейтронов из земной коры с лунными периодами и сейсмической активностью / Алексеенко В.В [и др.] // Физика земли. – 2009. – № 8. – С. 91 - 100.
18. Thermodynamic and kinetic study of scandium (III) complexes of DTPA and DOTA: a step toward scandium radiopharmaceuticals / Pniok, M. [et al.] // Chemistry—A European Journal. – 2014. – Vol. 20(26). – P. 7944-7955.
19. Kannengießer S. Optimization of the Synthesis of Ac-225-labelled DOTA-Radioimmunoconjugates for Targeted Alpha Therapy, based on Investigations on the Complexation of Trivalent Actinides by DOTA: дис. – 2013.
20. Equilibrium, ^1H and ^{13}C NMR Spectroscopy, and X-ray Diffraction Studies on the Complexes Bi(DOTA)- and Bi(DO₃A-Bu) / Éva Csajbók [et al.] // Inorganic Chemistry. – 2003. – Vol. 42(7). – P. 2342-2349.
21. Thermodynamic and Kinetic Features of Bi³⁺ Complexes with the Azamacrocycles H₄BATA and H₄DOTA / Matazova E.V. [et al.] // Chemistry Select. – 2022. – Т. 7. – №. 44. – С. e202203108.
22. Investigating the complexation of the Pb²⁺/Bi³⁺ pair with dipicolinate cyclen ligands / Lima L.M.P. [et al.] // Inorganic Chemistry. – 2015. – Т. 54. – №. 14. – С. 7045-7057.
23. Benzoazacrown compound: A highly effective chelator for therapeutic bismuth radioisotopes/ Matazova E.V. [et al.] // MedChemComm. – 2019. – Т. 10. – №. 9. – С. 1641-1645.
24. Zhu Z., Zhang W., Cheng C. Y. A literature review of titanium solvent extraction in chloride media // Hydrometallurgy. – 2011. – Т. 105. – №. 3-4. – С. 304–313.
25. Extraction of scandium, rare-earth elements, and yttrium from nitric acid solutions by selected diphosphine dioxides / Turanov A.N. [et al.] // Solvent Extraction and Ion Exchange. – 2000. – Т. 18. – №. 6. – С. 1109-1134.
26. Separation of ^{44}Ti from proton irradiated scandium by using solid-phase extraction chromatography and design of $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ generator system / Radchenko V. [et al.] // J Chromatogr A. – 2016. – Т. 1477. – С. 39–46.
27. Engineering a modular $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ generator: eluate evaluation in preclinical models and estimation of human radiation dosimetry / Benabdallah N. [et al.] // EJNMMI Res. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 17.

28. Kostelnik T. I., Orvig C. Radioactive Main Group and Rare Earth Metals for Imaging and Therapy: review-article // Chem Rev. – 2018. – Т. 119. – С. 902–956.
29. TOPAS: an innovative proton Monte Carlo platform for research and clinical applications. / J. Perl [et al.] // Med Phys. – 2012. – Nov;39(11):6818-37. doi: 10.1118/1.4758060.
30. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).
31. Lebedev S. G. Field-effect switching in nano-graphite films / Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2014. – V. 75. – №. 9. – P. 1029-1032.
32. Lebedev S. G. Evidence of Josephson-like behavior of thin granular carbon films / International Review of Physics. – 2008. – Т. 2. – №. 5. – P. 312-328.
33. Lebedev S. G. Traces of superconducting correlations in nanographite films / Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2020. – 31(23). – P. 20883-20898.
34. Lebedev S. G. Josephson Effect in nanographite films / Technical Physics. – 2022. – 67(10). – P. 696-699.
35. Dimensional reduction, quantum Hall effect and layer parity in graphite films / Yin Jun [et al.] // Nature Physics. – 2019. – 15.5. – P. 437-442.
36. Prazdnikov Yuri. Superinjection from oriented carbyne as the result of landau quantization in giant pseudo-magnetic field / Journal of Modern Physics. – 2013. – 4.7. – P. 994-999.
37. Mints R. G., Rakhmanov A. L. Critical state stability in type-II superconductors and superconducting-normal-metal composites / Reviews of Modern Physics. – 1981. – 53.3. – P. 559.
38. Lebedev S.G. Радиохимический монитор нейтронов для высокопоточных ядерных установок / Инноватика и экспертиза. – 2025. – Вып. 1(39). – С.169-176.
39. RU 2800807 C1, 2023.
40. Лифанов М.Н. Эффективная технология контроля радиационно-защитных свойств спецодежды пожарных АЭС // Наукоёмкие технологии. – 2007. – №1. – С. 3-15.
41. Спектрометрические комплексы СКС группы предприятий «Грин Стар». – URL: https://greenstar.ru/articles/spektrometruchekue_komplekcs.pdf (дата обращения 25.11.2025).
42. Универсальный процессор импульсных сигналов SBS-75. – URL: <https://greenstar.ru/sbs-75.html> (дата обращения 25.11.2025).
43. Обеспечение безопасного контроля радиационно-защитных свойств спецодежды пожарных / Лифанов М.Н. [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2024. – № 2. – С. 58-63.

44. Лифанов М.Н., Белянский К.Л. Способ безопасной оценки дезактивируемости материалов для средств индивидуальной защиты / Заявка на патент №2024134034.

45. Альбац Е.А., Лифанов М.Н., Логинов В.И. Радиационно-защитная одежда для работы в экстремальных условиях // Сборник тезисов XII Международной научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», 29-31 октября 2025 г., Москва / Под общ. ред. акад. РАН Л.А. Большова. – М.: ИБРАЭ РАН, 2025. – С. 68.

46. Система регистрации спектров МОРС-4 с микрокомпьютером Raspberry Pi 3 Model B / Д.В. Новиков [и др.] // Научное приборостроение. – 2018. – № 3. – С. 24-28.

47. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: Атомиздат, 1970. – 392 с.

48. В. Ф. Колесов. «Электроядерные установки и проблемы ядерной энергетики» // РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, 2013. – <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2018/11/Works-RFNC-VNIIEF-v22-1-16.pdf>.

49. В.Ф. Колесов, Б.Я. Гужовский. Повышение эффективности электроядерного трансмутационного устройства за счет многосекционной структуры бланкета // Атомная энергия. – 1994. – Т.76, вып. 1.

50. Research Stand Based on the Linac of the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. Thorium Energy for the World. / S.F. Sidorkin [et al.] // Proceedings of the ThEC13 Conference, CERN, Globe of Science and Innovation, Geneva, Switzerland, October 27-31, 2013. – Р. 311-326. – <http://www.springer.com/in/book/9783319265407>.

51. ^{222}Rn content variations at ground and underground conditions / Etezov R.A. [et al.] [Электронный ресурс] // arXiv.org. – 2021. – URL: <https://arxiv.org/abs/2110.15289> (дата обращения: 03.12.2024).

52. Создание воздушной ионной камеры высокого давления для измерения содержания ^{222}Rn в подземных условиях / Гаврилюк Ю.М. [и др.] // Отчёт ЛНФИ БНО ИЯИ РАН. – 2023. Связь вариации потока тепловых нейтронов из земной коры с лунными периодами и сейсмической активностью / Алексеенко В.В [и др.] // Физика земли. – 2009. – N 8. – С. 91-100.

53. Bezrukov L.B. Sinev V.V. Looking for Geo-Antineutrino Flux from 40K by the Borexino Detector // Physics of Particles and Nuclei. – 2025. – Vol. 56, No. 3. – P. 866–870. – <https://doi.org/10.1134/S1063779624702423>. Русский текст опубликован в ЭЧАЯ – 2025. – Т. 56, №. 3. – С. 1448–1455.

54. Bezrukov L.B., Bykovsky A.S., Sinev V.V. Low metallicity solar model finds the prove in Borexino data [Электронный ресурс] // arXiv.org. – 2025. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.13470> (дата обращения 08.05.2025).

55. Antineutrino spectra by summation method used to fit experimentally measured reactor antineutrino spectrum [Электронный ресурс] / Sinev V.V. [et al.] // arXiv.org. – 2025. – URL: <https://arxiv.org/abs/2505.11513>.

56. Double Chooz θ_{13} measurement via total neutron capture detection / de Kerret H. [et al.] (Double Chooz Collaboration) // Nature Phys. – 2020. – Vol. 16. – P. 558. – <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0831-y>.

57. Землетрясение в Л’Акуиле [Электронный ресурс] // Википедия. – 2009. –URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8F%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D1%83%D0%B8%D0%BB%D0%B5_\(2009\)\(2009\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8F%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D1%83%D0%B8%D0%BB%D0%B5_(2009)(2009)) (дата обращения: 03.12.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.

A.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2025 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/17-пр от 15.05.2023 г.)

1. In vitro and in vivo behavior of ^{207}Bi -labelled microgels based carboxymethyl cellulose / Spiridonov V.V. [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2025. – Vol. 718 – Paper № 136866. – <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136866>.
2. Titchenko N.A., Egorova B.V., Kalmykov S.N. Features of TiIV and ScIII behavior in oxalic acid solutions affecting the $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ generating system based on anion exchange resins // Mend. Comm. – 2025. – Vol. 35. – P. 396-398. – <https://doi.org/10.71267/mencom.7656>.
3. Tuning the magnetic properties of sandwiched hexaferrite/cobalt ferrite exchange-coupled nanocomposites obtained in high-boiling organic solvent / Nigaard R. [et al.] // RSC advances. – 2025. – Vol. 15. – 32758-32767. – <https://doi.org/10.1039/D5RA04855A>.
4. $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ generator for direct synthesis of ^{213}Bi -labeled bioconjugates / Ermolaev S.V. [et al.] // Nuclear Medicine and Biology. – 2025. – Vol. 140-141. – Paper № 108975. –<https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2024.108975>.
5. Gas-chemical approach to $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ radionuclide generator for medical application / Zobnin V.A. [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. – 2025. – Vol. 215. – Paper № 111581. – <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111581>.
6. Preparation and Conduction of Experiments on the Irradiation of Biological Models in a Proton Beam / Akulinichev S.V. [et al.] // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2025. – V.89. – P. 1204–1208. – <https://doi.org/10.1134/S1062873825711936> (УБС1).
7. Akulinichev S.V. Study of the Flash Effect at the Proton Accelerator of INR RAS // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2025. – Vol. 89. – P. 1209–1215. – <https://doi.org/10.1134/S1062873825711948> (УБС1).
8. Мартынова В.В., Акуличев С.В., Яковлев И.А. Анализ клеточной гибели и пролиферативной активности клеточных культур при облучении протонами в режиме флэш // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2025. – Т.80, № 2. – С. 2520204 – <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2520204> (УБС2).
9. Glukhov S.I., Kuznetsova E.A., Akulinichev S.V. Factors Influencing the Biological Effects of FLASH Irradiation // Antioxidants (MDPI). – 2025. – V. 14. – P.1372. – <https://doi.org/10.3390/antiox14111372> (УБС2, Q1 WoS).

10. Lebedev S.G. Peculiarities of Superconductive Phase in Nanographite Films / Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2025. – 38:P.141. <https://doi.org/10.1007/s10948-025-06976-x>.

11. Лебедев С.Г. Радиохимический монитор нейтронов для высокопоточных ядерных установок / Инноватика и экспертиза. – 2025. – Вып. 1(39). – С. 169-176. <https://inno-exp.ru/archive/37/98-108.pdf>.

12. Zarubin M., Pikalov V., Gangapshev A. BioMuon experiment (Bioμ): review of studies on biological impact of high-energy muons and research prospects // International Journal of Radiation Biology. – 2025. – Vol. 101, No. 12. – P. 1169-1180. – <https://doi.org/10.1080/09553002.2025.2560882>.

13. Radionuclide Content in Needles of *Pinus sylvestris* L. in the Karachay-Cherkess Republic (Western Caucasus) / Mollaeva, M.Z. [et al.] // Biology Bulletin. – 2025. – Vol. 51. – P. 3602-3608. – <https://doi.org/10.3390/math11092171>.

A.2 Публикации, индексируемые Web of Science и Scopus

1. Specific Activity of Radionuclides in Cryoconite Sediments of Glaciers of the Central Caucasus (Tsey, Skazka, Bezengi), Russia / Tembotov R. [et al.] // In: Earth. – 2025. – Vol. 6, No. 2. – P. 60. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_10.

2. Bezrukov L.B. Sinev V.V. Looking for Geo-Antineutrino Flux from ^{40}K by the Borexino Detector // Physics of Particles and Nuclei. – 2025. – Vol. 56, No. 3 – P. 866 – 870. – <https://doi.org/10.1134/S1063779624702423>. Русский текст опубликован в ЭЧАЯ – 2025. – Т. 56, №. 3. – С. 1448 – 1455.

A.3 Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций, главы в книгах, индексируемые РИНЦ

1. Концентрирование Bi-213 в циркулирующем Ac-225/Bi-213 генераторе для прямого синтеза меченых соединений / Лапшина Е.В. [et al.] // Разделение и концентрирование в аналитической химии и радиохимии. Материалы VII Всероссийского симпозиума. – М.: “ТД Алоста”. – 2025. – Р. 292.

2. Получение биоконъюгатов, мученых изотопами висмута, в условиях циркулирующего генератора $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ / Халиуллина Д.Р. [et al.] // XI российская конференция «Радиохимии 2025». Сборник тезисов — М.: “ГХК Росатом”. – 2025. – Р. 421.

3. Менделеев из Тобольска. Взгляд в будущее. / Б.Л. Жуков // Наука и жизнь. – 2025. – №1. – <https://www.nkj.ru/special/mendeleev/52547/index.php?mobile=N>.

4. Методика облучения протонами живых моделей во флэш-режиме / Яковлев И.А. [и др.] // LXXV International Conference NUCLEUS-2025 Fundamental problems and applications // 1–6 июля 2025. СПбГУ, Санкт-Петербург <https://indico.spbu.ru/event/1/book-of-abstracts> (p. 217).

5. Оценка вклада нейтронов в дозу при облучении протонами / Мерзликин Г.В. [и др.] // LXXV International Conference NUCLEUS-2025 Fundamental problems and applications // 1–6 июля 2025. СПбГУ, Санкт-Петербург <https://indico.spbu.ru/event/1/book-of-abstracts> (p. 216).

6. Усиление флэш-эффекта в протонной терапии / С.В.Акулиничев // VIII Международный Форум онкологии и радиотерапии «FOR LIFE», Москва 15-19 сентября 2025. – <https://drive.google.com/file/d/1WglSbE1IS1MwiIP7kIeLdxdaeNeZAigu/view>.

7. Глухов С.И., Кузнецова Е.А., Акулиничев С.В. Флэш-эффект в радиобиологии и возможности его применения на практике // Конференция «Теоретическая и экспериментальная биофизика». Пущино, 4-6 марта 2025 (стр. 17), изд. «Синхробук» (SynchrobookTM), Пущино, 2025.

8. Lebedev S.G. Pseudo Magnetic Field, with a Strength of Hundreds of Teslas in the Nanographite Films / Report on the 11th Edition of World Nanotechnology Conference, March 23 -25, 2026, Singapore.

9. Альбац Е.А., Лифанов М.Н., Логинов В.И. Радиационно-защитная одежда для работы в экстремальных условиях // Сборник тезисов XII Международной научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», 29-31 октября 2025 г., Москва / Под общ. ред. акад. РАН Л.А. Большова. – М.: ИБРАЭ РАН, 2025. – С. 68.

10. Вопросы мониторирования излучений при исследовании фотоядерных реакций и активации материалов на линейном электронном ускорителе / Мицук В.В. [и др.] // LXXV Международная Конференция «ЯДРО – 2025. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Ядерно-физические технологии» (Санкт-Петербург, Россия, 1-6 июля 2025): Аннот. докл. / под ред. В.Н. Коваленко, Е.В. Андронова. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 283-284.

11. Ingeman S.V. Application of the clarified Database of parameters of $\beta-$ active atomic nuclei for antineutrino spectrum calculation // Материалы 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2024) – URL: <https://indico.particle.mephi.ru/event/436/sessions/212/>.

12. Расчетные спектры антинейтрино изотопов ядерного топлива, согласованные с экспериментальными / Синев В.В. [и др.] // LXXV Международная конференция ЯДРО-

2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии [Электронный ресурс]. – 2025. URL: <https://indico.spbu.ru/event/1/timetable/#20250701.detailed>.

13. Calculated antineutrino spectra from nuclear reactor fuel isotopes fission fragments conformed with experimentally measured ones / Sinev V.V. [et al.] // Материалы 22 Lomonosov Conference [Электронный ресурс]. – 2025. URL: https://lomcon.ru/?page_id=1243.

14. Агафонова Н.Ю., Ашихмин В. В., Колесников В.М. "Комплекс для мониторирования параметров подземных помещений" // Труды 66-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 31 марта–5 апреля 2025 г. Аэрокосмические технологии. – 2025. – С. 336. https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/a3a/lfi_kor.pdf.

15. Ингерман С. В. от коллаборации He-model. / О связи концентрации радона, CO₂ и плотностей аэроионов в подземных помещениях // Труды 66-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 31 марта–5 апреля 2025 г. Аэрокосмические технологии. – 2025. – С. 190 https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/d69/3_-fakt_2025.pdf.

A.4 Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства о регистрации программ, баз данных, иные РИД, имеющие официальную регистрацию

1. Лебедев С.Г. Способ изготовления сверхпроводящего резонатора ускорителя заряженных частиц, заявка на патент РФ №2025111332 2025.

2. Лебедев С.Г. Способ получения псевдомагнитного поля, напряженностью более 90 Тесла в нанографитовых пленках, заявка на патент РФ № 2025135215.

3. RU 2 834 904 C1, 2025.

4. Лифанов М.Н., Белянский К.Л. Способ безопасной оценки дезактивируемости материалов для средств индивидуальной защиты (СИЗ). Патент №2852345 от 8.12.2025 г.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 025663319 Российская Федерация. Программа для сбора и обработки информации в режиме реального времени с нескольких разных источников (prog_Troitsk_2.0.ps1): № 2025660511: заявл. 30.04.2025: опубл. 27.05.2025 бюл. 6 / Агафонова Н.Ю., Колесников В. М.; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663519 Российская Федерация. Программа унификации и объединения архивных баз данных от нескольких разных источников (Prog_Arxiv.psl): № 2025660508: заявл. 30.04.2025: опубл. 28.05.2025 бюл. 6 / Агафонова Н.Ю., Колесников В. М.; заявитель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685058 Российская Федерация. Программа микроконтроллера для сбора и обработки данных с разных датчиков с последующей выдачей их в архивный файл и на зависимые устройства (prog_TroitskMaster.ino): № 2025682265: заявл. 26.08.2025: опубл. 19.09.2025 бюл. 9 / Агафонова Н.Ю., Колесников В. М.; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685080 Российская Федерация. Программа ведомого микроконтроллера для получения секундных данных по разным параметрам с ведущего микроконтроллера, форматированием их в минутные, привязанные ко времени данные формата OHLC и выдачей их в компьютер (prog_TroitskSlave.ino)): № 2025682261: заявл. 26.08.2025: опубл. 19.09.2025 бюл. 9 / Агафонова Н.Ю., Колесников В. М.; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

A.5 Иные публикации по теме

1. С.Ф. Сидоркин. Мишенные сборки для нейтронных генераторов на основе протонных ускорителей. Курчатовский форум «Исследования с применением синхротронного излучения, нейtronов и электронов». 21 – 25 октября 2025 года. Москва.

2. Физико-технические особенности источников нейтронов на основе сильноточных протонных пучков. С.Ф. Сидоркин [и др.]. Доклад на международной научно-технической конференции «Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений для фундаментальных и прикладных исследований». 29 сентября - 03 октября 2025 г. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров.

3. Bezrukov L.B., Bykovsky A.S., Sinev V.V. Low metallicity solar model finds the prove in Borexino data [Электронный ресурс] // arXiv.org. – 2025. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.13470> (дата обращения 08.05.2025).

4. Sinev V.V. [et al.]. Antineutrino spectra by summation method used to fit experimentally measured reactor antineutrino spectrum [Электронный ресурс] // arXiv.org. – 2025. – URL: <https://arxiv.org/abs/2505.11513>.