

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук**

На правах рукописи

Садыков Жакыпбек Турланович

**Экспериментальные исследования на основе методики
трековых детекторов в физике элементарных частиц**

Специальность 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2026

Работа выполнена в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: Полухина Наталья Геннадьевна, доктор физ.-мат. наук, г.н.с. ФИАН
Официальные оппоненты: Ким Виктор Тимофеевич, доктор физ.-мат. наук, Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», зам. руководителя ОФВЭ, Заведующий лабораторией физики элементарных частиц
Юркин Юрий Тихонович, кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры Экспериментальной ядерной физики и космофизики НИЯУ МИФИ
Ведущая организация: Институт ядерных исследований Российской академии наук

Защита состоится _____ года в 12:00 на заседании диссертационного совета номер _____ на базе ФИАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте <https://www.lebedev.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
номер 24.1.262.03, д-р физ.-мат. наук _____ С. П. Баранов

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В экспериментах в области ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики исследуются свойства элементарных частиц и взаимодействия между ними. Для реализации научных программ таких экспериментов необходимы детекторы для обнаружения частиц и для измерения их различных характеристик, в частности, требуется реконструкция траектории частиц. По траекториям можно определить происхождение частицы, направление ее движения и даже более сложные параметры, такие как импульс или, при наличии магнитного поля, знак заряда частицы. Трековые детекторы широко используются в экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий [1–4]. В этих детекторах регистрация элементарных частиц сопровождается появлением наблюдаемых следов (треков), повторяющих траекторию движения элементарной частицы. Такая популярность трековых детекторов, в частности, детекторов на основе ядерной фотоэмульсии, не случайна и обусловлена целым рядом их достоинств: наглядностью результатов эксперимента; относительной простотой и дешевизной; способностью накапливать информацию в течение длительного времени, возможностью разделения треков частиц. Ни один из применяемых сейчас детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое, в частности, дает ядерная фотоэмульсия: при размере зерна 0.3–1 мкм, отклонение зерен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0.8 мкм, а при определенных условиях может быть уменьшено до 0.2 мкм. Использование двухсторонней эмульсии позволяет определять направление движения частиц с погрешностью менее одного миллирадиана [5]. Простота трековых детекторов также обеспечивает им существенное преимущество перед многими другими системами детектирования. Метод трековых детекторов непрерывно развивается, совершенствуется его методика, и в настоящее время трудно найти такую область науки и техники, где бы он ни использовался. Это и физика высоких энергий, и физика космических лучей, реакторная физика, металлургия, геология, археология, медицина, биология, исследования метеоритов и образцов лунных пород [6].

Целью данной работы была модернизация аппаратного и программного обеспечения сканирующего микроскопа комплекса ПАВИКОМ для обеспечения высокотехнологичной обработки и анализа данных трековых детекторов (ядерной фотоэмульсии и фосфатных стекол) при реализации экспериментальных исследований в физике элементарных частиц.

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

1. Интеграция новых аппаратных компонент установки и разработка программных модулей управления движением прецизионного столика микроскопа при автоматизированном сканировании;

2. Разработка и интеграция нового модуля в программном пакете для кластеризации изображений в фотографической ядерной эмульсии в процессе автоматизированного сканирования;

3. Сканирование и анализ данных трековых детекторов (фосфатных стекол и фотографической ядерной эмульсии) на модернизированном оборудовании;

4. Идентификация тяжелых ионов в детекторах из фосфатного стекла КНФС-3 по геометрическим и динамическим характеристикам треков, для этого потребовалась разработка новой методики поиска и идентификации треков тяжелых ионов в фосфатных стеклах;

5. Анализ и интерпретация экспериментальных угловых распределений потоков атмосферных мюонов, необходимых для разработки одного из этапов методики верификации результатов мюонографических исследований крупных объектов на примере распознавания визуально проверяемых элементов здания в Свято-Троицком Даниловом монастыре.

Научная новизна:

Впервые разработаны новые аппаратные (усовершенствованы основные узлы установки ПАВИКОМ, в частности, установлен концевой выключатель на вертикальный двигатель для защиты предметного стекла и объектива микроскопа от механических повреждений и разработано программное обеспечение для управления его функционированием; изготовлена и введена в действие новая система освещения по Келеру; интегрированы в состав установки новые камера Mikrotron EoSens 4CXP и объектив CFI Plan Fluor 20XC MI) и программные модули (в частности, интегрирована система управления столом MICOS в модуль Stage программы LASSO и разработан новый алгоритм кластеризации изображений для ядерных фотоэмульсий в процессе автоматизированного сканирования) для обработки эмульсионных пластин эксперимента SND@LHC на автоматизированном сканирующем микроскопе с диапазоном перемещения стола в горизонтальной плоскости 400 мм × 800 мм.

1. Разработан новый метод идентификации ионов в фосфатном стекле КНФС-3 на основе полученной экспериментально зависимости между скоростью изменения характеристик протравленных треков и зарядом частицы.

2. Для мюнографических исследований скрытой внутренней структуры крупных природных и промышленных объектов создана новая методика подтверждения состоятельности выбранных технических решений и достоверности полученных результатов на основе идентификации визуально проверяемых элементов.

Практическая значимость. Разработанное программное обеспечение для ПАВИКОМ успешно используется, прежде всего, при сканировании фотографической ядерной эмульсии в эксперименте SND@LHC. По результатам анализа данных этого эксперимента по изучению нейтрино высоких энергий, возникающих в pp -столкновениях при энергии $\sqrt{s}=13.6$ ТэВ на Большом адронном коллайдере, обнаружены восемь событий-кандидатов на взаимодействия мюонных нейтрино с превышением сигнала над фоном семь стандартных отклонений 7σ [7]. Этот результат подтверждает эффективность использования высокотехнологичного сканирующего оборудования для анализа данных об ускорительных нейтрино высоких энергий и открывает возможности для их изучения на высокой статистике.

Выполненная автором оптимизация протокола обмена данными с контроллером стола в ходе модернизации сканирующих комплексов ПАВИКОМ и MIC1 в лаборатории университета им. Федерико II, Неаполь позволила повысить быстродействие в ~ 7 раз - за счет минимизации длины команд время отклика системы было сокращено с 200 мс до 30 мс [8, 9].

Разработанная методика идентификации тяжелых ионов в детекторах из фосфатного стекла стала основой для продолжения исследования возможности использования твердотельных трековых детекторов для термохроматографии на колонке с золотым слоем менее летучих, чем 112, элементов (например, флеровий), для которых переход от сорбции на золотом слое к десорбции лежит в области высоких температур выше двухсот градусов Цельсия [10–12].

Инновационный неинвазивный метод мюнографии позволяет осуществлять исследование внутренней структуры крупных природных и промышленных объектов без использования радиоактивных источников. На примере успешно реализованного первого в России современного успешного мюнографического эксперимента в Свято-Троицком Даниловом монастыре в полной мере продемонстрированы возможности мюнографии как уникального метода исследования скрытой структуры крупных объектов, получены новые данные о скрытых особенностях внутренней структуры зданий и территории монастыря. Разработанная автором методика подтверждения достоверности полученных мюнографических результатов стала необходимым этапом всех последующих

экспериментов в России и позволила реализовать серию работ на промышленных объектах и на объектах культурного наследия [13–16].

Авторские мюнографические методические подходы и технические решения с использованием эмульсионных трековых детекторов открывают широкие перспективы для исследований в области ядерной энергетики, вулканологии, дефектоскопии, геологии, археологии, и других областях на основе эффективного, экономичного и экологически безопасного метода мюнографии, используемого, в частности, для создания систем мониторинга проблемных объектов для минимизации последствий возможных природных и техногенных катастроф для населения, инфраструктуры и окружающей среды. Стоит отметить, что мюнография историко-археологических объектов, исключая проведение раскопок и нарушение целостности памятников, имеет широкие перспективы внедрения для изучения охраняемых объектов культурного наследия.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модернизированное аппаратное обеспечение автоматизированного сканирующего микроскопа ПАВИКОМ (усовершенствованы основные узлы ПАВИКОМ на уровне современных технологий) с имплементацией новых алгоритмов сканирования в программный пакет для обработки эмульсионных пластин эксперимента SND@LHC (алгоритм кластеризации изображений для ядерных фотоэмульсий в процессе автоматизированного сканирования и внедрение управляющих команд в модуль управления предметным столом для обеспечения интеграции контроллера с координатным столом в системе LASSO).
2. Методика идентификации тяжелых ионов в детекторах из фосфатного стекла КНФС-3 по геометрическим и динамическим характеристикам треков.
3. Основанная на идентификации видимых элементов, методика верификации экспериментальных данных, как часть общей методики мюнографического исследования скрытой структуры крупных природных и промышленных объектов (на примере исследования здания в Свято-Троицком Даниловом монастыре).

Публикации. Общий список публикаций автора включает 25 статей. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 статьях, которые изданы в журналах, рекомендованных ВАК, список приведен в конце автореферата.

Достоверность внедрения нового аппаратного и программного обеспечения подтверждается работоспособностью сканирующих станций, а также наличием результатов, подтвержденных при перекрестном сканировании трековых детекторов на микроскопах в университете им. Федерико II, Неаполь. Результаты работы были

опубликованы в международных рецензируемых журналах с высоким рейтингом [7-16]. Достоверность сделанных выводов не вызвала сомнений у рецензентов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных конференциях

- TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2023,
- Fundamental and Applied Problems of Modern Physics 2023,
- Международной конференции памяти академика НАН РК Бооса Э. Г. 2023,
- 2-ая Международная конференция по физике высоких энергий, материаловедению и нанотехнологиям (ICHEPMS-2024, International Conference on High Energy Physics, Materials Science and Nanotechnology), посвящённой памяти Эрнста Гербертовича Бооса, академика НАН РК, 2024 г.

Результаты работы автора вошли в отчёты по гранту № BR10965191 («Комплексные исследования в области ядерной и радиационной физики, физики высоких энергий и космологии для разработки конкурентоспособных технологий») Министерства образования и науки Республики Казахстан, а также Российского научного фонда в рамках программы "Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами" (проект № 23–12–00054).

Личный вклад. Автором были выполнены работы по имплементации нового программного обеспечения и оборудования сканирующей станции ПАВИКОМ, а также экспериментальные исследования по использованию фосфатных стекол для регистрации осколков сверхтяжелых ядер и по мюонографии. Автор принимал непосредственное активное участие в работе по созданию алгоритма кластеризации изображений в ядерных фотоэмульсиях. Результаты, представленные к защите, получены при определяющем вкладе диссертанта. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в пяти публикациях [8, 9, 10, 11, 15] в журналах, рекомендованных ВАК. В публикациях [8, 9] отражен личный вклад автора, заключающийся в инженерной и программистской работе (сборка установки, интеграция драйверов стола MICOS в ПО LASSO, настройка команд управления), в его методической и экспериментальной работе (создание и настройка освещения по Келеру, проведение сканирования эмульсий RUN 1, получение характеристик треков и подтверждение работоспособности комплекса). В статьях [10, 11] вклад автора заключается в тестировании различных травителей, отработке метода определения толщины стравленного слоя, измерении и анализе геометрических и динамических характеристик треков, и создании на их основе методики идентификации заряда иона. В публикации [15] личный вклад автора заключается в разработке алгоритма

проверки достоверности мюнографических результатов путем распознавания по угловым распределениям потоков мюонов визуально проверяемых элементов объекта исследования.

Содержание работы:

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена трековым детекторам, которые используются в физике элементарных частиц, в частности ядерной фотографической эмульсии.

Среди всех детекторов, используемых в физике элементарных частиц, ядерно-эмульсионные детекторы частиц обладают самым высоким пространственным разрешением при изучении характеристик ионизирующих частиц. С помощью эмульсионных детекторов были сделаны многие открытия в физике элементарных частиц (открытие радиоактивности, мезонов, космических лучей, осцилляций мюонных нейтрино в таонные и др. [1, 5, 6]). Обработка данных трековых детекторов, проводившаяся ранее операторами на оптических микроскопах вручную, требовала огромных затрат труда и времени. Скорость измерений при этом оказывалась невысокой, что определяло низкую статистику обработанных событий. Кроме того, при таких измерениях была достаточно велика вероятность появления трудно улавливаемых ошибок, поэтому получаемые результаты плохо поддавались проверке на возможные сбои, возникающие в процессе обработки материала (например, потери измерителями следов частиц и другие ошибки).

В последние годы этот недостаток в значительной мере был преодолен благодаря прогрессу, который достигнут в производстве прецизионной техники, и созданию оптических столов с высокой точностью перемещения по командам от компьютеров, широкому применению современных приборов с зарядовой связью (CCD-камеры) для регистрации и оцифровывания оптических изображений и вычислительным возможностям современных компьютеров. Благодаря применению этих достижений прецизионной механики, возможностям средств вычислительной техники и разработке необходимого программного математического обеспечения стала реальностью полная автоматизация труда микроскопистов. При измерениях в таком автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в трековых детекторах, полученные при помощи CCD-камер, вводятся в компьютеры, математическое обеспечение которых позволяет производить поиск, распознавание и изучение треков, восстанавливать их пространственное положение. Такой автоматизированный метод измерений практически полностью исключает использование изнурительного визуального труда микроскопистов и

ускоряет процесс обработки приблизительно на три порядка по сравнению с ее длительностью даже при использовании так называемых полуавтоматов. Новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий, что раньше было практически нереально. Создание подобных автоматизированных комплексов позволило перейти на более высокий уровень проведения экспериментов, использующих трековую технику регистрации частиц, и существенно расширило круг задач, где эта техника может быть эффективно использована.

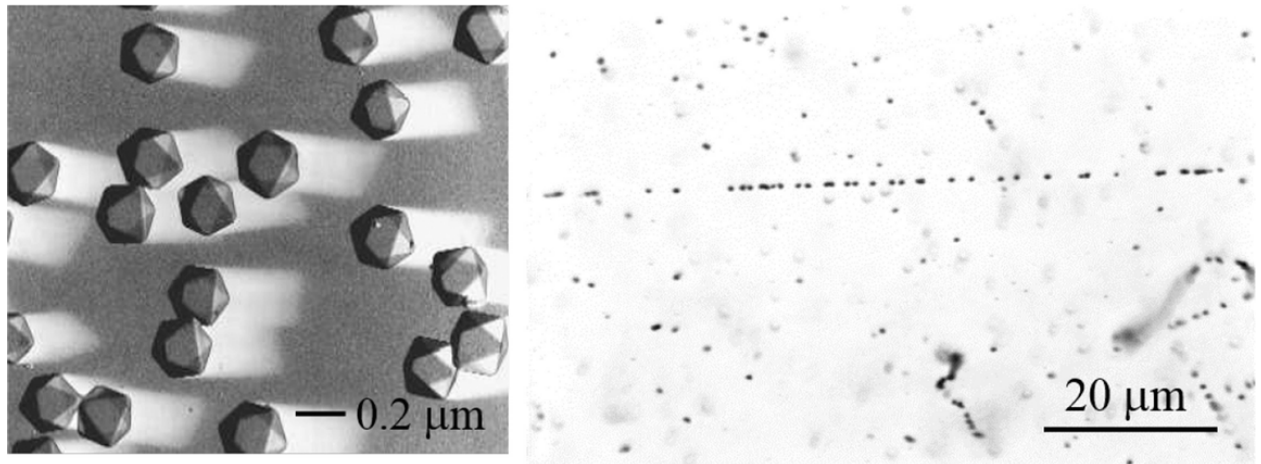
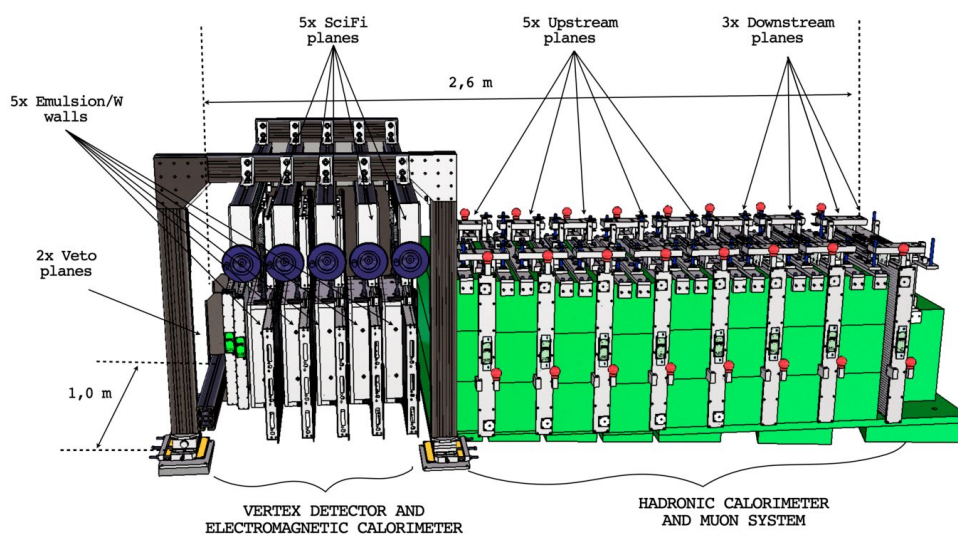


Рисунок 1 – Слева: кристаллы бромид серебра (линейный размер 0,2 мкм), видимые с помощью электронного микроскопа. Справа: след, оставленный минимально ионизирующей частицей ($10 \text{ ГэВ } \pi^-$) в ядерных эмульсиях; обнаружено около 36 зерен на 100 мкм. Комптоновские электроны с энергией приблизительно 100 кэВ также видны в правом нижнем углу изображения [6]

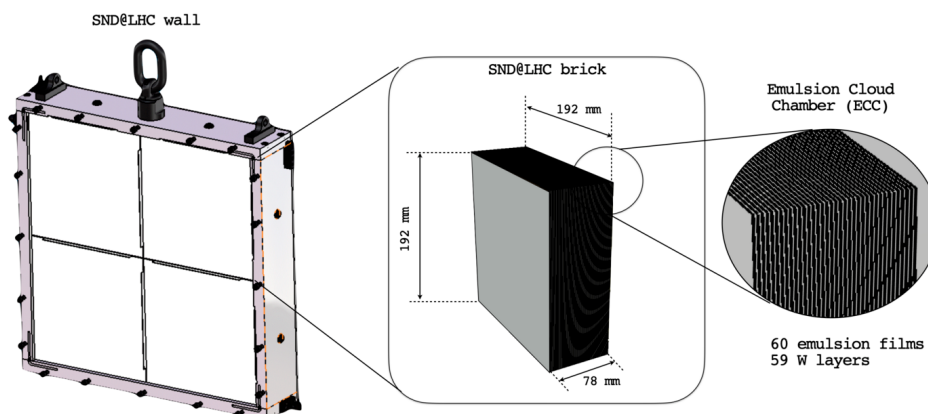
Вторая глава содержит информацию о технологиях сканирования трековых детекторов, о модернизации существующих механических компонентов и о внедрении инновационных методов сканирования. В начале главы описана модернизация сканирующей станции ПАВИКОМ-1.

Модернизация установки ПАВИКОМ-1 была проведена для обеспечения совместимости с требованиями эксперимента SND@LHC и эффективной обработки получаемых данных. Эксперимент SND@LHC [7] направлен на изучение высокоэнергетичных нейтрино с псевдобыстродами в диапазоне $7,2 < \eta < 8,4$. Детектор представляет собой гибридную систему, состоящую из мишени массой 830 кг (рисунок 2, а), изготовленной из чередующихся слоев вольфрамовых пластин, эмульсионных и электронных трекеров, которая одновременно выполняет функцию электромагнитного калориметра (рисунок 2, б). Также детектор включает адронный калориметр и систему идентификации мюонов. После облучения и проявки эмульсии из ЦЕРН отправляют в

лаборатории стран-участниц для сканирования и анализа данных, в том числе, в Россию - в ФИАН.



а)



б)

Рисунок 2 – Схема эксперимента SND@LHC, а – общая схема, б – эмульсионная стена, состоящая из четырех блоков, каждый из которых состоит из 60 эмульсионных пленок, чередующихся с 59 вольфрамовыми листами.

Таким образом, сканирование облучённой ядерной эмульсии осуществляется в специально оборудованных лабораториях стран-участниц эксперимента, оснащенных автоматизированными оптическими микроскопами, скорость сканирования которых, измеряемая в единицах поверхности двухсторонних эмульсионных слоев в единицу времени, достигает $\sim 190 \text{ см}^2/\text{ч}$. Одна из таких сканирующих установок, автоматизированный измерительный комплекс ПАВИКОМ (Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс), находится в Физическом институте

имени П.Н. Лебедева РАН. Высокотехнологичное оборудование этого измерительного комплекса предназначено для обработки экспериментальных данных, полученных с помощью трековых детекторов [8, 9].

Режим функционирования комплекса ПАВИКОМ удовлетворяет целому ряду требований к универсальной прецизионной сканирующей системе, а именно: возможностью безостановочного сканирования и обработки изображений в режиме реального времени, независимостью от типа детектора и обрабатываемых данных, возможностью быстрой адаптации к новому оборудованию и возможностью эффективной работы в многопроцессорных системах, участия в распределенных вычислениях и максимальной гибкостью программного обеспечения. При создании программного обеспечения применялся модульный подход, позволяющий достичь необходимой гибкости при настройке системы и осуществлять сканирование детекторов различных типов. В результате последней модернизации были усовершенствованы основные узлы установки ПАВИКОМ на уровне современных технологий, что позволило увеличить скорость сканирования и повысить эффективность обработки данных путём увеличения разрешающей способности и скорости захвата изображения. Проведённая модернизация позволила обеспечить улучшение качества обработки и объём обрабатываемого материала, что подтверждает статус установок ПАВИКОМ как уникальных для России и соответствующих лучшим образцам мирового уровня.

Коммуникационное взаимодействие между контроллером и управляющим вычислительным устройством реализуется через интерфейс COM-порта. Для обеспечения интеграции контроллера с координатным столом в системе LASSO (рисунок 3) требуется внедрение управляющих команд в модуль управления предметным столом. При этом, без изменения входных и выходных параметров функций, представленных в таблице 1, следует адаптировать алгоритмы их выполнения согласно требуемым командам управления.

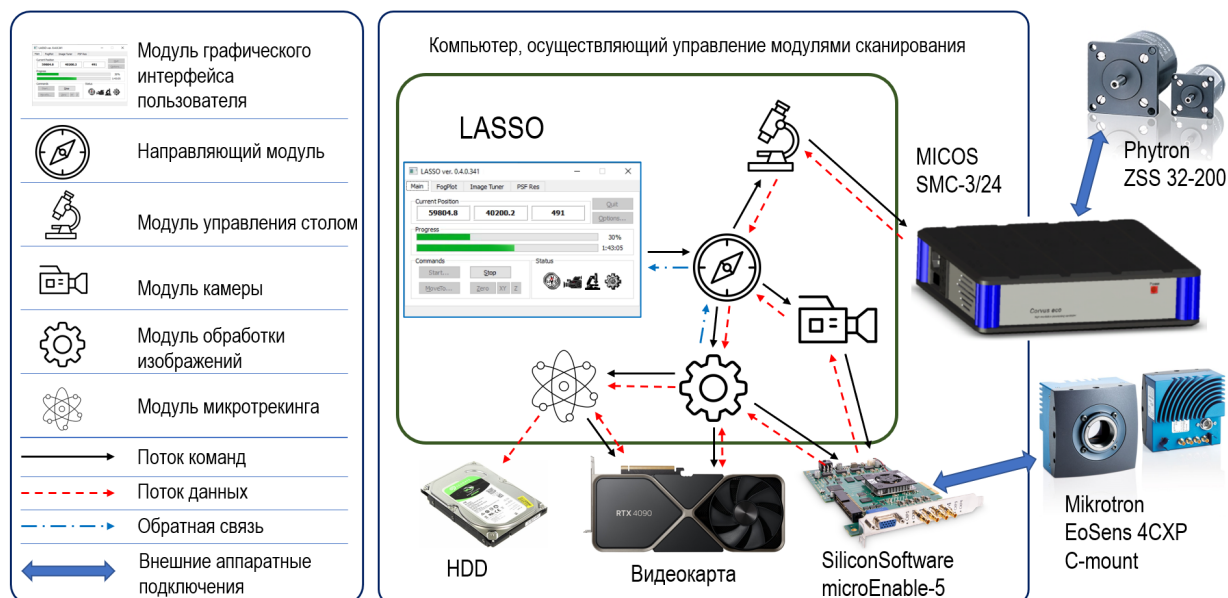


Рисунок 3 – Схема структуры LASSO в комплексе ПАВИКОМ-1.

В ходе выполненной модернизации микроскопа

- был установлен ограничитель (концевой выключатель) на вертикальный двигатель для защиты предметного стекла и объектива микроскопа от механических повреждений;
- изготовлена и введена в действие новая система освещения по Келеру. Необходимость получения равномерно освещенного поля зрения и освещение его максимально широким пучком света достигается в современной микроскопии именно путем организации освещения по Келеру;
- интегрированы в состав установки новые камера Mikrotron EoSens 4CXP и объектив CFI Plan Fluor 20XC MI;
- имплементирована программная система управления столом MICOS в модуль Stage программы LASSO.

Таблица 1 – Основные функции модуля управления контроллером

Наименование функции	Входные параметры	Выходные параметры	Краткое описание
ReadCfg	—	—	Считывание параметров, передаваемых в контроллер из конфигурационного файла
IsConnected	—	Логические 0 или 1, как результат опроса	Опрос контроллера на наличие связи

Initialize	—	—	Проведение операций по подготовке контроллера к работе
Finalize	—	—	Проведение операций по отключения контроллера
SetVel	Порядковый номер оси движения, предыдущая скорость	Массив скоростей, где индекс является порядковым номером оси	Выставление скорости движения стола
SetAccel	Порядковый номер оси движения, предыдущее ускорение	Массив ускорений, где индекс является порядковым номером оси	Выставление ускорения
SetDecel	Порядковый номер оси движения, предыдущее замедление	Массив замедлений, где индекс является порядковым номером оси	Выставление замедления
Zero	Порядковый номер оси	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Обнуление координат
Stop	—	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Остановка движения на всех осях
QueryPos	Порядковый номер оси	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция чтения координат с последующей записью в историю движения
MoveTo	Класс с координатами	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция, осуществляющая движение в заданные координаты
MoveStage	Класс с параметрами: координаты, скорость, ускорение, замедление.	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция, осуществляющая движение в координаты с заданной скоростью, ускорением, замедлением, а также с записью координат в историю движения.

MoveStage2	Два класса с параметрами: координаты, скорость, ускорение, замедление	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция, отвечающая за движение Stop&Go. В первую итерацию функция ожидает окончания движения, далее задает сканирование по глубине. Во вторую итерацию функция ожидает окончания сканирования по глубине, отдает команду на движение к следующей позиции и выходит.
StartMove	Порядковый номер оси, скорость	—	Начинает движение по заданной оси с определенной скоростью
StopMove	Порядковый номер оси	—	Прекращает движение по заданной оси

Распознавание полной картины взаимодействий частиц в детекторе требует восстановления так называемых базовых (состоящих из двух микротреков) и объёмных (проходящих через весь детектор) треков. При облучении эмульсий на ускорителе плотность треков очень высока, обработать и проанализировать все треки можно только на огромных вычислительных мощностях ЦЕРН. Поэтому задачей сканирующих лабораторий, входящих в сотрудничество, является подготовка базы данных по микротрекам (МТ) для их окончательной обработки в ЦЕРН. На модернизированной установке были отсканированы эмульсии эксперимента SND@LHC. Эти эмульсии были облучены во время одного из первых тестовых сеансов, RUN 1, интегральная светимость которого составила $0,5 \text{ фб}^{-1}$ [7] при полной загрузке нейтринного детектора. В результате были получены необходимые данные по пространственному распределению микротреков в этих эмульсиях.

Эмульсионная пластина нейтринного детектора SND@LHC эксперимента имеет размеры $192 \times 192 \text{ мм}^2$ и толщину чувствительного слоя 70 мкм. На рисунке 4 показаны распределения реконструированных онлайн в процессе сканирования микротреков для верхнего и нижнего эмульсионного слоя соответственно, цветовая шкала отображает количество восстановленных МТ.

Область распределений МТ в плоскости XY на рисунке 4 имеет размер $182 \times 182 \text{ мм}^2$, меньший номинального размера эмульсионного слоя, что объясняется необходимым при сканировании техническим отступом от края эмульсии. Экспериментальные результаты

демонстрируют равномерность распределений МТ в объеме как для верхнего, так и нижнего эмульсионных слоёв, на всей площади эмульсионной плёнки.

Другой важной характеристикой ядерной эмульсии, которую необходимо контролировать при сканировании, является чувствительность, т. е. число проявленных зерен серебра на 100 мкм трека однозарядной частицы. На рисунке 5 даны распределения по числу проявленных зерен в верхнем и нижнем эмульсионном слое, а также суммарное распределение по двум слоям.

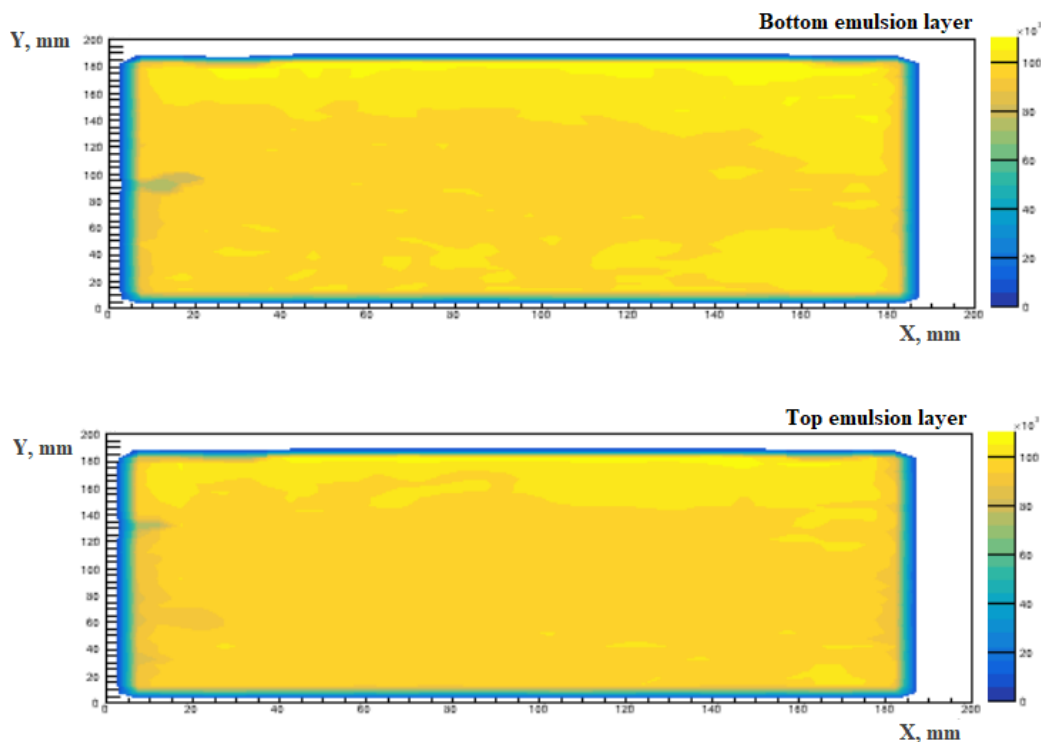


Рисунок 4 – Распределение микротроек для верхнего и нижнего слоев ядерной эмульсии

Результаты на рисунке 5 демонстрируют высокую чувствительность эмульсии, а именно более 30 зерен на 100 мкм трека и её равномерность как для верхнего (красный цвет), так и для нижнего (синий цвет) эмульсионного слоя.

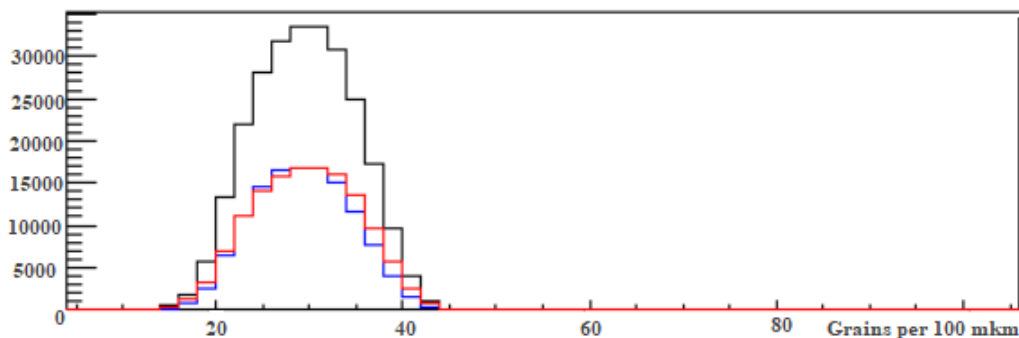


Рисунок 5 – Чувствительность эмульсионного слоя: синяя линия – нижний эмульсионный слой, красная линия – верхний эмульсионный слой, черная – их суммарное распределение

Экспериментальные результаты, полученные с помощью сканирующей станции ПАВИКОМ-1, представленные на рисунках 4 и 5, демонстрируют успешность выполненной модернизации, а именно: адекватное измерение характеристик произведенной с высоким качеством эмульсии, корректную настройку сложной оптической системы и возможность в полном объеме выполнять сканирование эмульсий эксперимента SND@LHC для создания базы данных по микротрекам.

Приобретенный опыт успешно выполненной модернизации ПАВИКОМ стал основанием для приглашения Ж.Т.Садыкова в лабораторию университета им. Федерико II в Неаполе для реализации аналогичного комплекса работ на сканирующем комплексе MIC1. Автором были выполнены работы по имплементации нового сканирующего прецизионного столика, состоящего из контроллера G 900K044, а также двигателей V-412 компании PI в состав оборудования комплекса. Помимо калибровки движения двигателей потребовалось разработать модуль управления движением стола, включающий в себя функции, описанные в таблице 1.

Была также интегрирована в систему видеокамера нового поколения (Microtron EoSens 4CXP 2) с 21 Мпикс и объектив 10-х (Nikon CFI Plan Fluor 20X MI). Все это позволило увеличить скорость сканирования двухсторонних эмульсионных слоев, по сравнению с прецизионным столиком прошлого поколения, со $\sim 180 \text{ см}^2/\text{ч}$ до $500 \text{ см}^2/\text{ч}$ с. Профиль движения сканирующей станции в разогнанном режиме показан на рисунке 6.

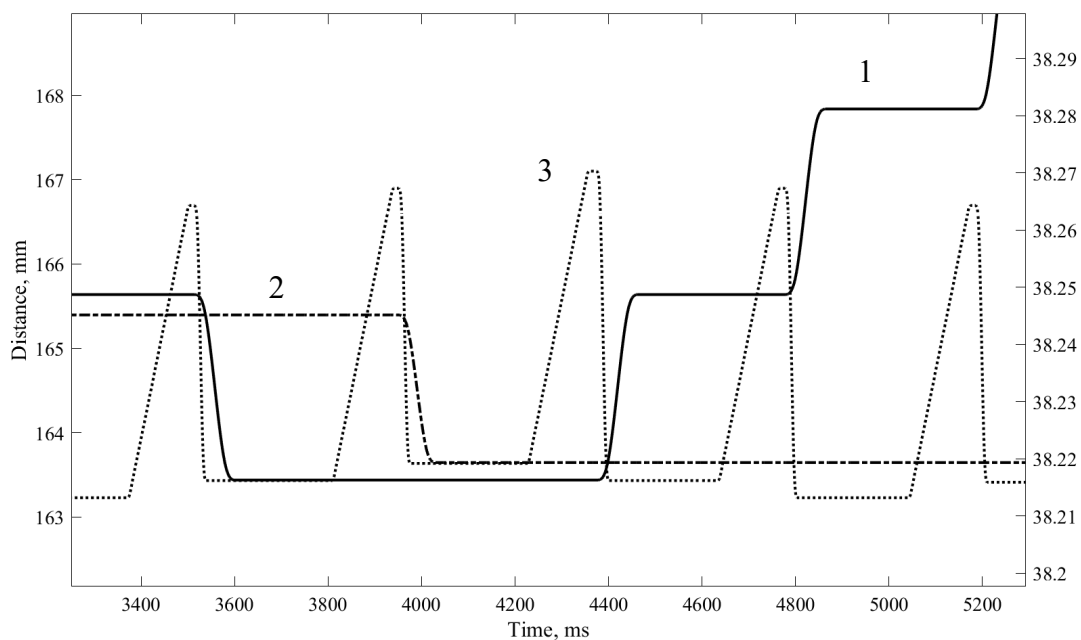


Рисунок 6 – Профиль движения сканирующей станции. 1 – горизонтальное перемещение (X), 2 – горизонтальное перемещение (Y), 3 - вертикальное перемещение.

Затем описывается разработанный автором новый алгоритм кластеризации изображений в ядерной фотоэмульсии, который использует метод разделения изображения на отдельные объекты, каждый из которых состоит из 16 пикселей, расположенных в виде квадратной матрицы размером 4x4 (рисунок 7 (1)). Каждая ячейка этой матрицы соответствует определенному пикселю и указывает на его точное положение на исходном изображении. Общее количество различных комбинаций расположения пикселей внутри такой матрицы составляет 65536.

Пиксели могут быть представлены в виде двоичных чисел, где уровень черного или белого определяет значение (1 для черного и 0 для белого, рисунок 7 (2, 3)). Эти бинарные значения могут быть преобразованы в десятичные числа путем простого преобразования совокупности битов в его десятичный эквивалент (рисунок 7 (6, 7)). Матрица 4x4 может быть представлена одним десятичным числом в диапазоне от 0 до 65535 (рисунок 7 (4)).

В дальнейшем формируется база данных, представляющая собой массив структур, который содержит информацию о каждой ячейке. В базе данных хранятся следующие данные о ячейке: количество кластеров, маска каждого кластера, сжатая маска возможных соседей кластера, а также количество пикселей в каждом кластере. Под маской подразумевается десятичное число, характеризующее набор значений битов в матрице. Для доступа к информации используется индекс, соответствующий матрице размером 4x4.

После разделения изображения на отдельные объекты, с помощью базы данных определяются кластеры. В цикле производится сшивка кластеров посредством сравнения маски соседей с соседним кластером. Когда последний кластер будет сшит алгоритм готов.

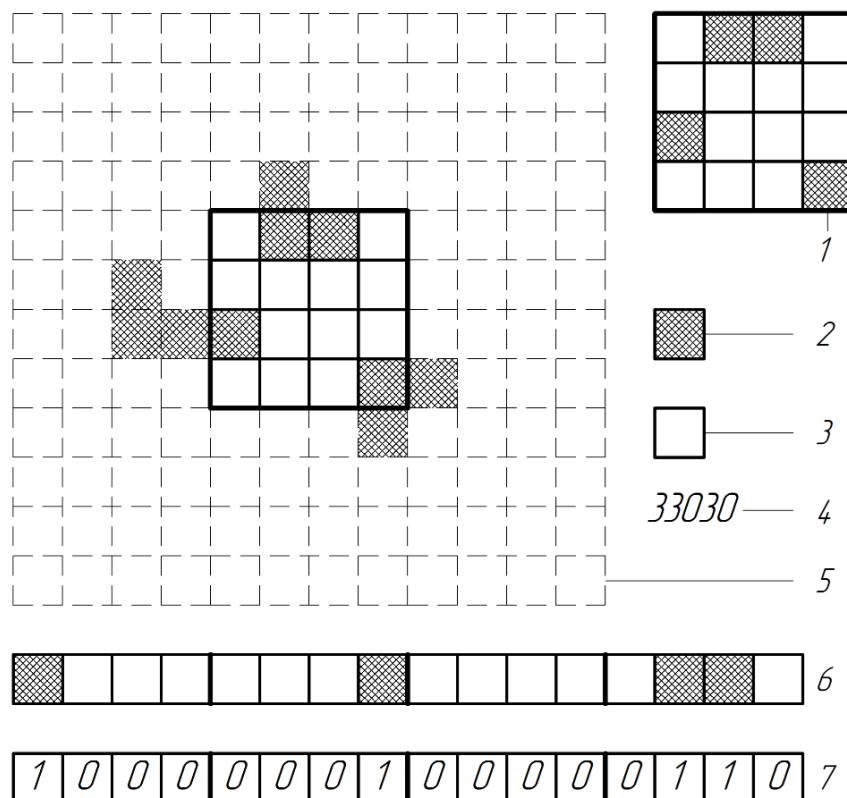


Рисунок 7 – Алгоритм кластеризации Clustering 16. Цифрами показаны этапы алгоритма: 1 – выделенная ячейка кластеризации, 2 – пиксель, принадлежащий кластеру (прошедший порог почернения), 3 – пиксель, не принадлежащий кластеру (не прошедший порог почернения), 4 – десятичное число, соответствующее ячейке кластера, 5 – исходное изображение, 6 – разложенная ячейка с почерневшими пикселями, 7 – соответствующая (6) разложенная ячейка, представленная в двоичной системе

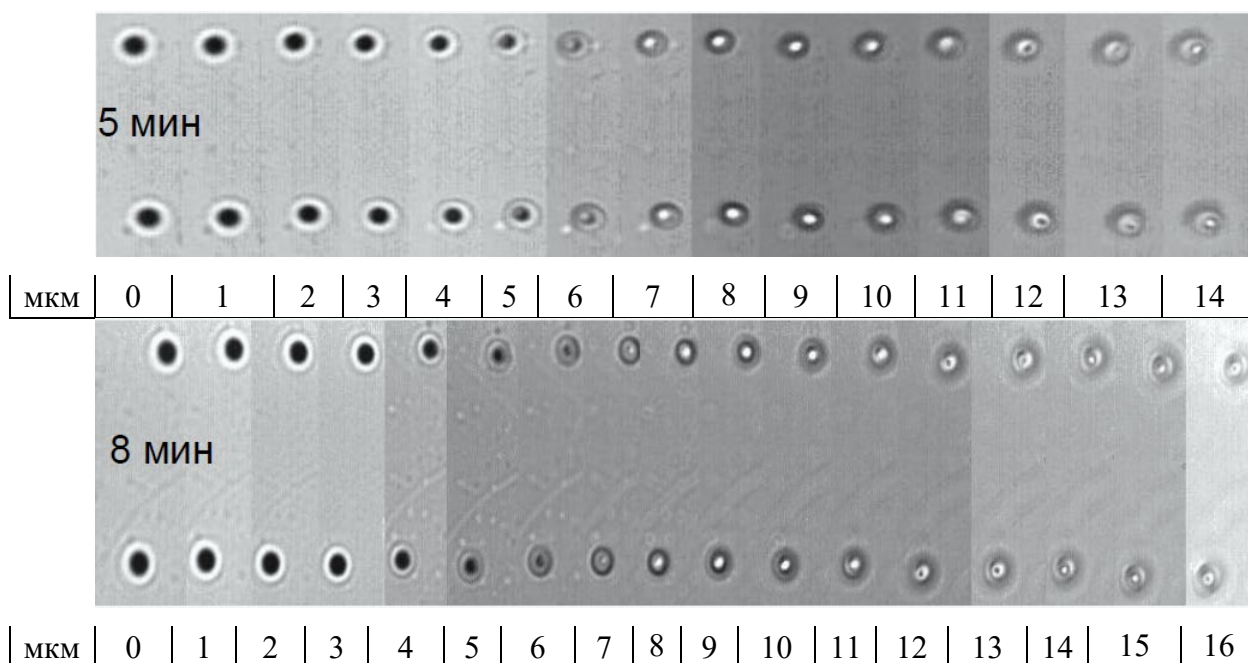
Третья глава посвящена разработке методики поиска редких событий распада сверхтяжелых ядер с помощью детекторов из фосфатного стекла.

Проблема существования сверхтяжелых трансформированных элементов является одной из актуальных проблем современной физики. Крупнейшие экспериментальные физические лаборатории мира работают над синтезом сверхтяжелых ядер [17, 18]. Поэтому весьма актуальной является задача создания эффективных детекторных систем для регистрации и идентификации новых синтезированных сверхтяжелых элементов. Диэлектрические трековые детекторы, в том числе изготовленные из стекла, обладают высокой эффективностью регистрации тяжелых ионов и низкой чувствительностью к фоновому излучению и, следовательно, широко используются в экспериментальной физике, в том числе в физике тяжелых ионов [19–23]. Использование таких оптически прозрачных детекторов из фосфатных стекол позволяет, после процедуры их химического травления,

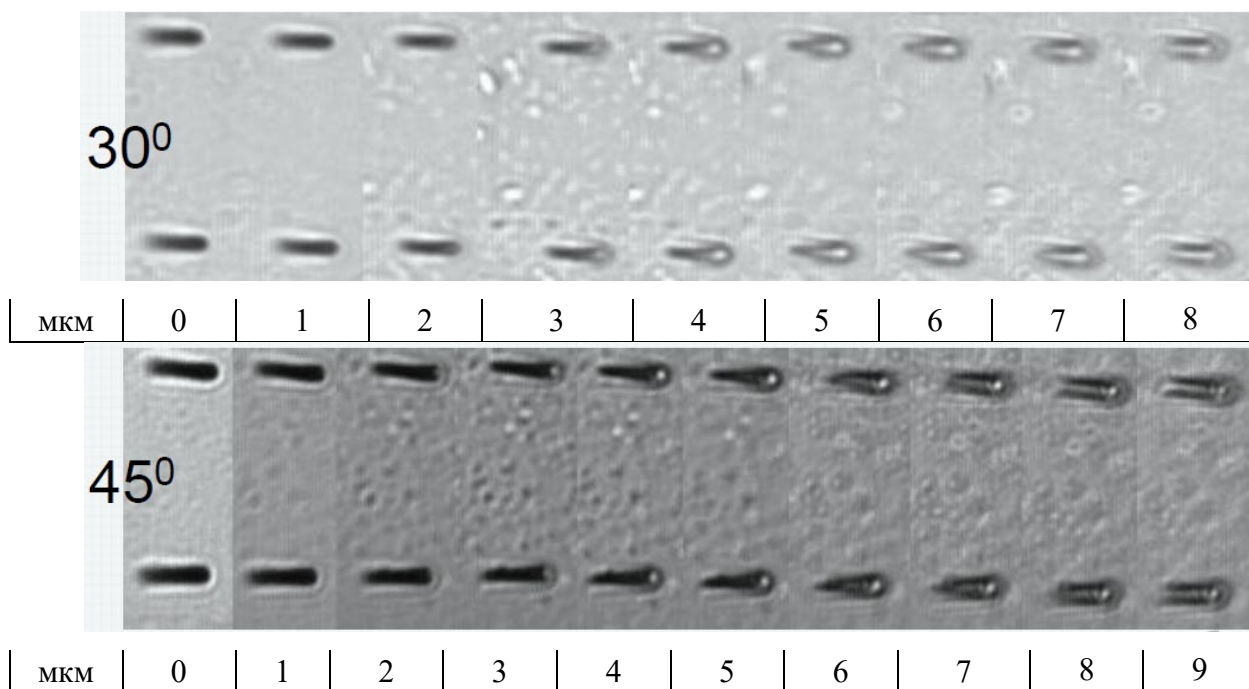
выполнять сканирование стекла на оптических микроскопах с целью поиска и идентификации следов ядер.

Принцип действия диэлектрического детектора основан на эффекте разрушения локальной кристаллической структуры материала по траектории проникновения быстрого тяжелого иона. Это локальное разрушение усиливается при последующем селективном травлении, когда поврежденные участки материала вступают в реакцию с травителем более интенсивно (с большей скоростью), чем неповрежденные, что приводит к образованию видимых протравленных каналов размером до нескольких десятков микрон. Связь между скоростью травления в области скрытого следа и потерями на ионизацию является основой для определения характеристик частицы. Таким образом, идентификация тяжелых ядер в оптически прозрачных диэлектрических детекторах основана на анализе геометрических параметров вытравленных треков, поскольку масштаб радиационного повреждения диэлектрического материала пропорционален заряду частицы.

В реализованных при определяющем участии автора тестовых облучениях на ускорителе фосфатных стекол около 100 образцов размерами $10 \times 5 \times 4$ мм, обеспечивающих оптимальное сочетание оптической прозрачности и механической прочности, были облучены пучками ионов $^{40}\text{Ar}^{8+}$, $^{84}\text{Kr}^{17+}$ и $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 1,16 МэВ/нуклон при различных углах наклона пучка к поверхности стекла.



а) Вертикальное падение, энергия ионов Хе $E=65\text{--}68\text{МэВ}$.



б) Облучение ионами Хе с $E=160$ МэВ под углами падения 30° и 45° , время травления 5 мин.

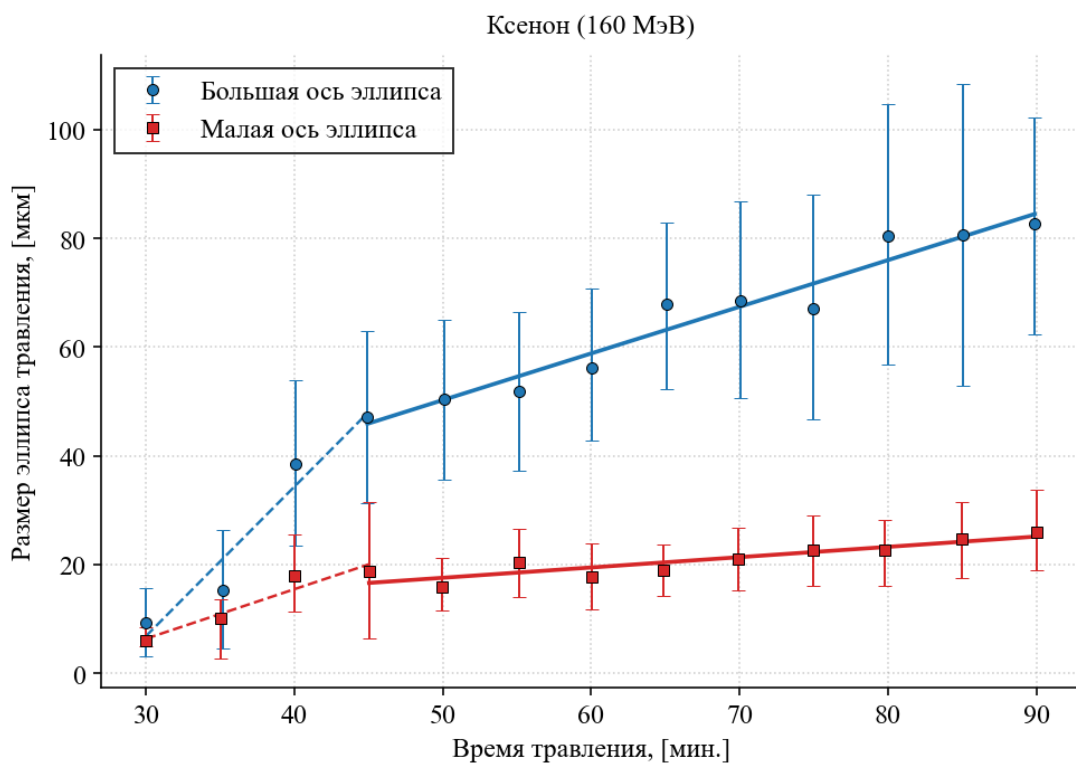
Рисунок 8 – Форма лунок ионов Хе, образовавшихся в результате травления в HF для разных времен травления: а) вертикальное вхождение, энергия ионов $E=65-68$ МэВ, время травления указано на рисунке; б) вхождение под углами 30° и 45° к вертикали, энергия ионов $E=160$ МэВ, интервал между последующими травлениями 5 мин.

На рисунке 8 показаны результаты травления. Представлены фотографии треков ионов $^{132}\text{Xe}^{26+}$ в стекле, полученные в тестовых облучениях при различных углах наклона пучка и различной продолжительности травления.

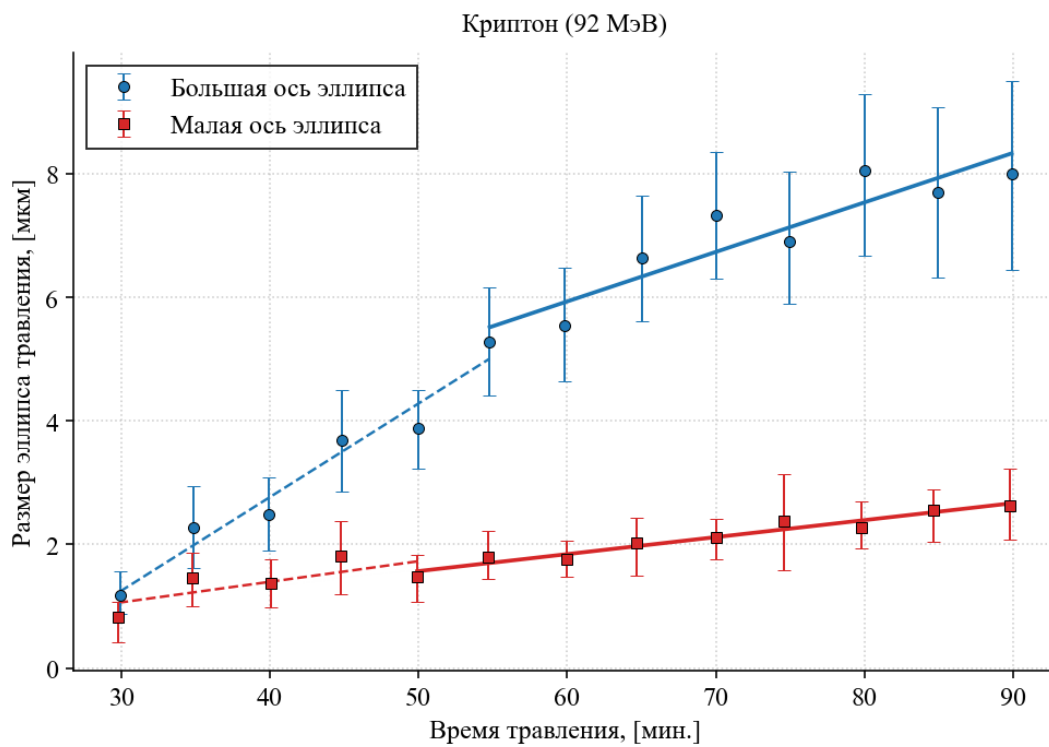
Результаты травления в 20% HF треков ядер разного заряда с углом входа в поверхность стекла 30° представлены на графиках (рисунок 9) зависимости от продолжительности травления размеров большой и малой осей эллипса – лунки, образовавшейся в стекле при прохождении иона. Размеры лунок протравленных треков измеряются на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ с использованием авторских программ.

Характер полученных зависимостей показывает, что при выбранном режиме обработки процесс травления распадается на две части. Сначала, при более коротких временах травления, происходит формирование трека травления до остановки ядра. В области после "излома" избирательность травления пропадает, происходит изотропное растравливание материала без дальнейшего углубления трека. Скорость травления, определяемая как угловой коэффициент соответствующего отрезка, становится заметно

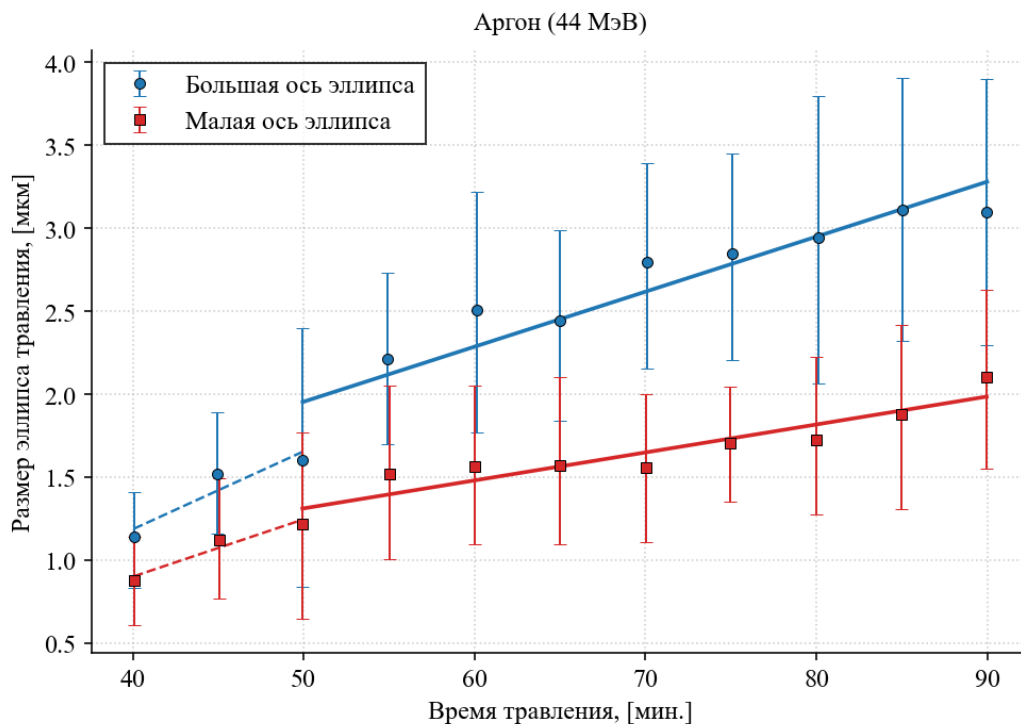
ниже. В области второго сегмента скорость травления, определяемая как угловой коэффициент соответствующего сегмента, заметно ниже, чем в первом.



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Зависимость большой и малой осей эллипса на поверхности стекла от продолжительности травления для различных ионов ((а) — аргона, (б) — криптона и (в) — ксенона). Угол наклона луча к поверхности стекла составляет 30° .

На рисунке 10 представлены коэффициенты наклона сегментов (скорости изменения осей эллипса) в зависимости от заряда иона. Сравнение показывает, что при коротких интервалах травления (рисунок 9) эта зависимость более выражена, в то время как с увеличением продолжительности травления чувствительность к заряду снижается (рисунок 10). Из этого следует, что при данных условиях интервалы травления, превышающие 50 мин, менее информативны для определения характеристик ионов.

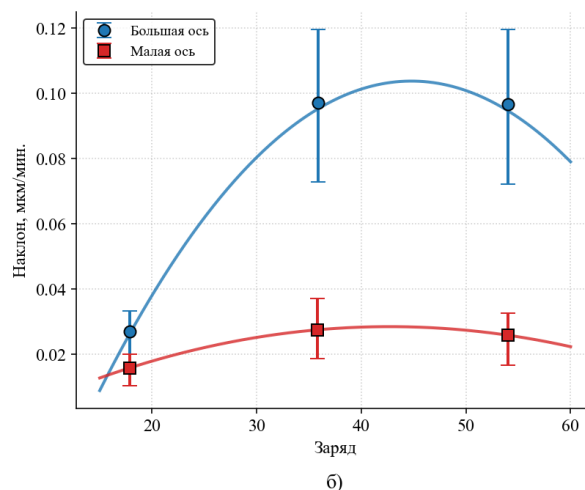
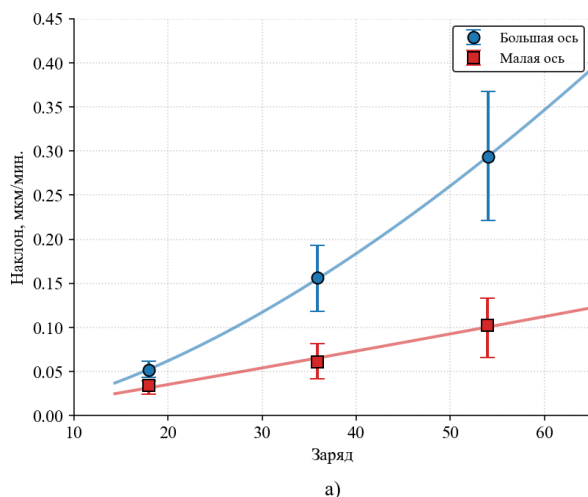


Рисунок 10 – Зависимость коэффициентов наклона (скорости изменения размеров трека) от заряда ионов для большой (красная линия) и малой (черная линия) осей эллипсов: (а) продолжительность травления от 30 до 45 минут; (б) продолжительность травления более 50 минут. Экспериментальные точки аппроксимируются параболой.

Представленный анализ зависимости геометрических параметров трека в стекле от продолжительности травления и скорости этого изменения позволяет разработать алгоритм идентификации ионов в фосфатном стекле. Заряд иона может быть оценен на основе зависимостей, аналогичных полученным в наших калибровочных экспериментах (рисунок 11), путем интерполяции обратной функции. Травление с небольшими интервалами и мониторинг характеристик протравленных треков повышают надежность идентификации ионов.

Результаты проведенных исследований позволили предложить алгоритм идентификации иона при его замедлении в фосфатном стекле, в основе которого лежит установленная связь заряда со скоростью изменения размеров лунки в фазе избирательного травления. Последовательность действий при определении характеристик ядра по его треку в стекле можно описать следующим образом. Рассмотрим случай облучения стекла разными ионами, имеющими различные углы вхождения. Сформированные ими латентные треки имеют каждый свой оптимальный режим травления. Чтобы не пропустить ядра с небольшим зарядом или идущие под малым углом к поверхности и уходящие в стекло на небольшую глубину, необходимо проводить травление с небольшими интервалами времени (порядка нескольких минут), каждый раз измеряя характеристики протравленных каналов. По каждому протравленному треку строится зависимость размеров лунок от времени травления и определяются скорости изменения этих размеров. По кривым, аналогичным полученным в наших калибровочных экспериментах (рисунок 10), производится оценка заряда иона методом интерполяции обратной функции.

Таким образом, зависимость коэффициентов наклона сегментов от заряда иона, показанная на рисунке 10, позволяет оценить заряд других ядер, для которых была проведена процедура травления со временем травления до 45–50 мин и был определен коэффициент наклона. На рисунке 11 стрелками показано определение заряда ядра при значении наклона 25 микрон в минуту дающего оценку $Z = 49$. Чтобы оценить точность определения заряда, можно использовать величину погрешности измерения наклона для криптона ($Z = 36$), определяя, какие заряды соответствуют верхнему и нижнему пределам погрешности. Вспомогательные линии на графике показывают, что эти границы

соответствуют зарядам $Z = 32$ и $Z = 39$. Таким образом, наклон в 0,25 микрон в минуту соответствует заряду $Z = 49 \pm 3$. Данный алгоритм позволяет оценить точность определения заряда ионов по предлагаемому методу.

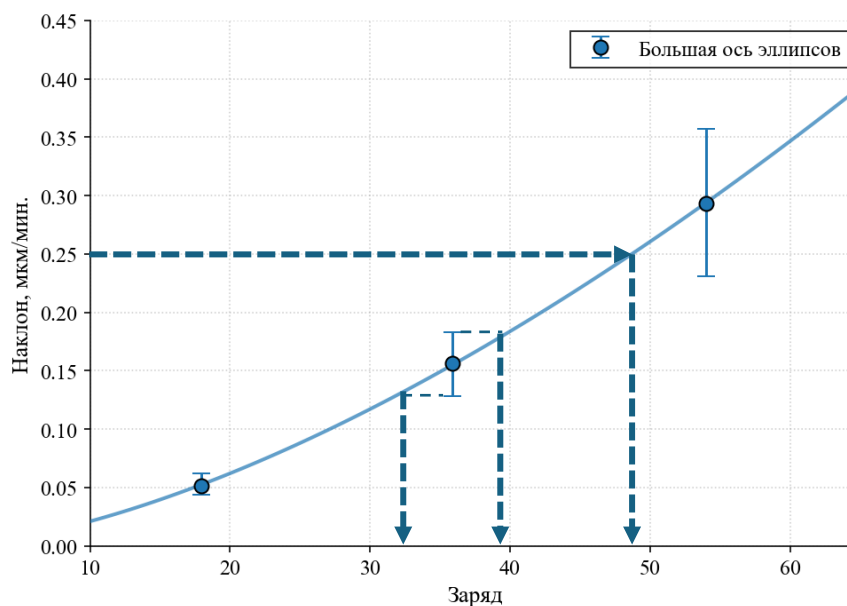


Рисунок 11 – Алгоритм определения заряда ионов.

В настоящей работе калибровочные кривые получены для ионов с фиксированной энергией около 1,1 МэВ/нуклон. В общем случае, поведение этих кривых должно зависеть также от энергии и угла вхождения частицы, и функция для определения её характеристик будет задаваться не кривыми на плоскости, а поверхностью. Тогда для определения заряда может быть применена двойная интерполяция.

Четвертая глава посвящена описанию первого в России успешного мюонографического эксперимента, целью которого, кроме поиска скрытых особенностей внутренней структуры, была также необходимость демонстрации возможностей перспективного неинвазивного метода мюонографии для исследования скрытой внутренней структуры крупных природных и промышленных объектов (на примере исследования зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря). Неинвазивный метод мюонографии, анализирующий угловые распределения проникающих атмосферных мюонов, позволяет обнаруживать аномалии плотности вещества и восстанавливать объёмные изображения скрытой внутренней структуры крупномасштабных природных и промышленных объектов на поверхности земли и под ней. Нарушения структуры различных крупных объектов, связанных с жизнедеятельностью человека, могут являться причиной природных и техногенных катастроф. Своевременное обнаружение скрытых проблемных зон даёт возможность предотвратить катастрофическое развитие ситуации и обеспечить безопасность людей и экономию материальных ресурсов. Мюонография

является инновационной основой технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения, сохранения объектов культурного наследия.

Свято-Троицкий Данилов монастырь является удобным объектом для тестирования разработанной методики: относительно небольшой объект, содержащий как скрытые неоднородности плотности во внутренней структуре зданий и территории, так помещения и постройки, которые можно использовать для визуальной настройки детекторов. Объект характеризуется невыраженным вертикальным рельефом местности и запретом на рытьё шурфов, что позволяет отработать приёмы пространственной настройки детекторной системы и методов обработки данных для работы с околоразрывными потоками мюонов.

В ходе успешно выполненного исследования в Свято-Троицком Даниловом монастыре автором была предложена и успешно реализована ставшая впоследствии одним из необходимых этапов всех мюонографических работ коллектива новая методика верификации экспериментальных мюонографических данных по распознаванию визуально проверяемых структурных элементов (на примере здания Церкви Похвалы Божьей Матери (ЦПБМ)), дополнительно к используемой всеми группами в мире методике сравнения модельных и экспериментальных распределений потоков мюонов.

Этот представленный в четвертой главе эксперимент является совместной работой нескольких российских институтов (МИСИС, ФИАН, НИИЯФ МГУ, ООО «АВК Славич»). Успешная его реализация выявила неизвестные ранее особенности структуры зданий и территории монастыря, способствовала научно-техническому освоению и развитию самого метода мюонографии, стала яркой демонстрацией возможностей мюонографии.

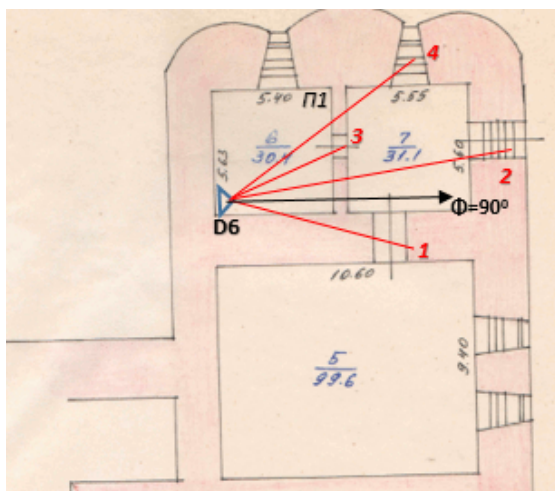
За долгую историю комплекс монастыря неоднократно реконструировался, а историческая документация, включающая планы построек, была безвозвратно утрачена. С помощью «просвечивания» атмосферными мюонами зданий и подземных зон монастыря предполагалось обнаружить возможные скрытые неоднородности (подвальные помещения, захоронения или склепы). Учитывая невозможность проведения раскопок из-за статуса монастыря как объекта культурного наследия федерального значения, применение в данном случае неинвазивного метода мюонографии – единственно возможный метод.

Предметом изучения в данном эксперименте стали здания Церкви Похвалы Божьей Матери и Церкви Всех Святых, а также территория между ними (рисунок 12).

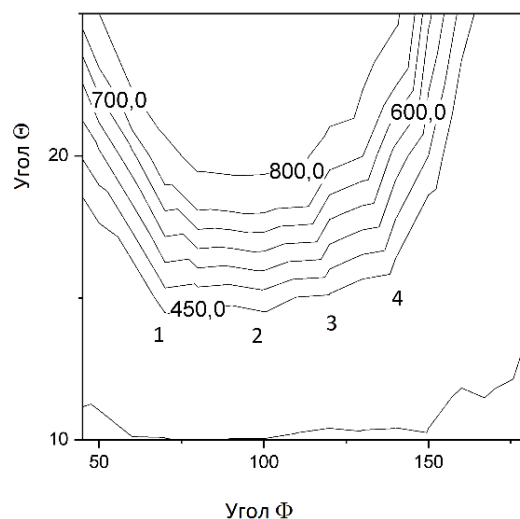


Рисунок 12 – Территория Свято-Троицкого Данилова монастыря. Цифрами на красном фоне обозначены области исследований: 1 – подвалы здания Церкви Похвалы Божьей Матери (ЦПБМ) и прилегающая территория; 2 – возможные остатки старого фундамента здания Церкви Всех Святых; 3 – участок территории между зданиями церквей; 4 – Троицкий собор.

Одной из задач эксперимента, именно в решении которой был определяющий вклад автора, стала проверка методики, конкретно, её чувствительности к изменениям количества материала на пути мюонных потоков, приходящих с разных направлений. Эта проверка проводилась на видимых архитектурных элементах ЦПБМ. Анализ результатов измерений показал, что использованные в работе детекторы «чувствуют» пустоты (дверные и оконные проёмы, переходы между помещениями) размером от $50 \times 50 \text{ см}^2$ на фоне окружающих стен на расстоянии 10–15 м. Этот результат иллюстрируют данные детектора 6, находившегося в подвале ЦПБМ (рисунок 13, а). На рисунке 13, б показан фрагмент распределения числа мюонов, полученного в детекторе, на котором выступы, отмеченные цифрами, соответствуют направлениям на пустоты, обозначенным теми же цифрами на рисунке 13, а.



а)

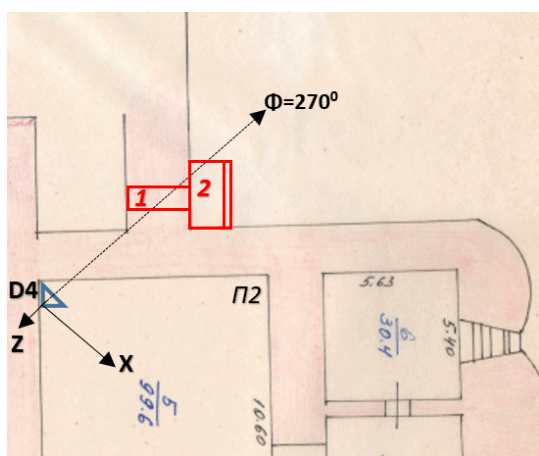


б)

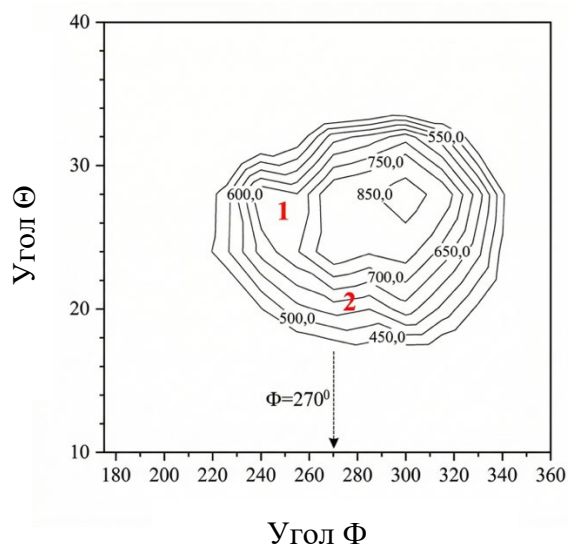
Рисунок 13 – а) План части подвала ЦПБМ, просматриваемой детектором 6. Указаны лучи, пересекающие элементы строения: 1 – переход из маленького подвального помещения в большое, 2 – вход в подвальные помещения ЦПБМ, 3 – переход между маленькими подвальными помещениями, 4 – окно в маленьком подвальном помещении.

б) Линии уровня, полученные по данным детектора 6 для направления «назад». Небольшим локальным объектам, типа дверных или оконных проёмов, соответствуют небольшие пики на линиях уровня.

Данные других детекторов также демонстрируют соответствие между особенностями хода линий уровня и направлениями на реальные фрагменты зданий. Ниже это соответствие проиллюстрировано данными детекторов 4 (рисунок 14) и 5 (рисунок 15).



а)



б)



в)

Рисунок 14 – Результат экспозиции детектора 4: а – схема установки детектора; б – линии уровня, полученные по данным детектора для направления «вперед» (цифрами показаны особенности распределения); в – фотография двери и массивной лестницы, «увиденных» детектором, находившемся в подвале на глубине 3 метра на расстоянии примерно 7 метров от комнаты за дверью (1) и лестницы (2).

На рисунке 15 представлен результат измерения потоков мюонов детектором 5 в направлении назад. На рисунке 15, а цифрами 1 и 2 обозначены оконные проёмы в подвале ЦПБМ, а на рисунке 15, б приведён результат обработки данных детектора в переменных tx , ty , где эти проёмы, обозначенные теми же цифрами, чётко видны на гистограмме.

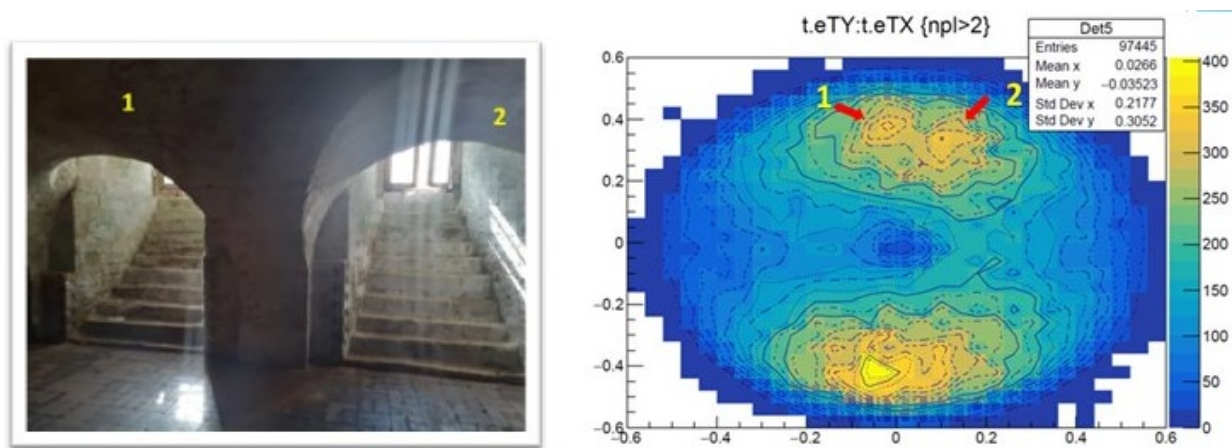


Рисунок 15 – Оконные проёмы в подвале ЦПБМ, «увиденные» детектором 5: а – фотография оконных проёмов, б – распределение потоков мюонов в переменных tx и ty , цифрами 1 и 2 указаны «сигналы» от оконных проёмов.

Таким образом, регистрация методом мюонографии и анализ с помощью разработанного программного обеспечения наблюдаемых архитектурных элементов здания ЦПБМ позволила подтвердить состоятельность авторской технологии мюонографии с применением эмульсионных детекторов и достоверность получаемой информации.

Убедительные результаты, полученные описанным методом для видимых структурных фрагментов здания ЦПБМ, дали основание использовать его для поиска и исследования недоступных областей, таких как скрытые части подвалов, неизвестные захоронения, исторические фундаменты и т. д. С этой целью при дальнейшем анализе данных были рассмотрены попарные пересечения секторов обзора (лучей) детекторов, зарегистрировавших особенности на линиях уровня (выпуклости, соответствующие менее плотным областям или впадины, соответствующие более плотным областям). В результате были выделены области, в которых предположительно могли находиться фрагменты с аномальной плотностью.

Итогом эксперимента стало обнаружение в замурованной части подвалов ЦПБМ двух пустых комнат и значительного уплотнения (стены, перегородки) по направлению к главному входу в монастырь. Обнаружен неизвестный воздуховод на уровне первого этажа ЦПБМ. На территории монастыря между зданиями ЦПБМ и ЦВС выявлены три полости, происхождение и назначение которых может представлять большой интерес для дальнейших археологических изысканий [13 – 16, 24]

В **заключении** сообщается, что в результате работы над диссертацией была осуществлена модернизация аппаратного и программного обеспечения сканирующего комплекса ПАВИКОМ для обеспечения высокотехнологичной обработки и анализа данных трековых детекторов (фотографической ядерной эмульсии и фосфатных стекол) при реализации экспериментальных исследований в физике элементарных частиц.

При определяющем участии автора модернизирован и введен в действие самый большой сканирующий микроскоп комплекса, ПАВИКОМ, для сканирования ядерной эмульсии эксперимента SND@LHC. Проведённая модернизация обеспечила корректную настройку сложной оптической системы и возможность в полном объеме выполнять сканирование эмульсий эксперимента и первичную обработку данных.

Основными результатами диссертации являются:

1. Установка новых аппаратных и программных модулей управления движением прецизионного столика автоматизированного сканирующего микроскопа ПАВИКОМ с диапазоном перемещения стола в горизонтальной плоскости 400 мм × 800 мм и обеспечение их совместимости с требованиями эксперимента SND@LHC.

3. Повышение скорости отклика аппаратной части комплекса (с 200 мс до 30 мс) за счет оптимизации структуры управляющих команд.

4. Разработка и интеграция в программный пакет ПАВИКОМ нового модуля кластеризации изображений в фотографической ядерной эмульсии, обеспечивающего эффективную первичную обработку данных при увеличенном поле зрения и скорости сканирования.

5. Идентификация тяжелых ионов в детекторах из фосфатного стекла КНФС-3 по геометрическим и динамическим характеристикам треков.

6. Создание для всех последующих мюнографических измерений новой методики подтверждения состоятельности выбранных технических решений и достоверности полученных результатов, как части общей методики мюнографического исследования скрытой структуры крупных природных и промышленных объектов, на основе полученных угловых распределений потоков атмосферных мюонов для визуально проверяемых элементов (на примере исследования здания Церкви Похвалы Божьей Матери в Свято-Троицком Даниловом монастыре).

7. Сканирование и первичный анализ данных трековых детекторов (фотографической ядерной эмульсии и фосфатных стёкол) на модернизированном комплексе ПАВИКОМ с применением новых программных и аналитических методов обработки.

Публикации. Общий список публикаций автора включает 25 статей. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 статьях, которые изданы в журналах, рекомендованных ВАК:

Burtebayev, N.; Chernyavskiy, M.; Gippius, A.; Kalinina, G.; Konovalova, N.; Nassurlla, M.; Kvochkina, T.; Nassurlla, M.; Okateva, N.; Pan, A.; et al. Phosphate Glass Detectors for Heavy Ion Identification. *Universe* 2022, 8, 474. <https://doi.org/10.3390/universe8090474>

Burtebayev, N., Argynova, K., Chernyavskiy, M.M. et al. Method for Determining the Etching Rate in Phosphate Glass Detectors. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 49, 350–355 (2022). <https://doi.org/10.3103/S1068335622100062>

Alexandrov, A.B., Vasina, S.G., Galkin, V.I. et al. A Noninvasive Muonography-Based Method for Exploration of Cultural Heritage Objects. *Phys. Part. Nuclei* 53, 1146–1175 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063779622060028>

Vasilev, V.T., Konovalova, N.S., Okateva, N.M. et al. Modernization of the Automated Scanning Complex for Data Processing of the SND@LHC Experiment. *Phys. Atom. Nuclei* 86, 2251–2255 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063778823090272>

Адаптация автоматизированной сканирующей установки ПАВИКОМ-1 для обработки ядерных эмульсий эксперимента SND@LHC, М.М. Чернявский, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Т.В. Щедрина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, КСФ, № 9, 27–35, 2024

Список литературы

1. Observation of a likely example of the decay of a charmed particle produced in a high energy neutrino interaction / E. Burhop [и др.] // *Physics Letters B*. — 1976. — Т. 65, № 3. — С. 299—304.
2. Measurement of the fragmentation of Carbon nuclei used in hadron-therapy / De Lellis G. [и др.] // *Nuclear Physics A*. — 2011. — Т. 853. — №. 1. — С. 124-134.
3. Nuclear Research Emulsions II: Particle Behavior and Emulsion Applications / W. H. Barkas, D. H. Davis // *Physics Today*. — 1974. — Июль. — Т. 27, № 7. — С. 49-50. — URL: [https://doi.org/ 10.1063/1.3128700](https://doi.org/10.1063/1.3128700).
4. Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions. 2 / C. M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini, C. F. Powell // *Nature*. — 1947. — Т. 160. — С. 486—492.
5. The OPERA film: New nuclear emulsion for large-scale, high-precision experiments // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2006. — Янв. — Т. 556, № 1. — С. 80—86.
6. Nuclear Emulsions / A. Ariga [и др.] // *Particle Physics Reference Library: Volume 2: Detectors for Particles and Radiation* / под ред. С. W. Fabjan, H. Schopper. — Cham: Springer International Publishing, 2020. — С. 383—438.
7. Observation of collider muon neutrinos with the SND@LHC experiment / The SND@LHC Collaboration R. Albanese, A. Alexandrov, F. Alicante, et al // *Phys. Rev. Lett.* 131, 031802, 2023 / 10.1103/PhysRevLett.131.031802.
8. Modernization of the Automated Scanning Complex for Data Processing of the SND@LHC Experiment / Vasilev, V.T., Konovalova, N.S., Okateva, N.M. et al. // *Phys. Atom. Nuclei* 86, 2251–2255 (2023).
9. Адаптация автоматизированной сканирующей установки ПАВИКОМ-1 для обработки ядерных эмульсий эксперимента SND@LHC / М.М. Чернявский, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Т.В. Щедрина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова // *КСФ*, № 9, 27–35, 2024
10. Phosphate Glass Detectors for Heavy Ion Identification / Burtebayev, N.; Chernyavskiy, M.; Gippius, A.; Kalinina, G.; Konovalova, N.; Nassurlla, M.; Kvochkina, T.; Nassurlla, M.; Okateva, N.; Pan, A.; et al. // *Universe* 2022, 8, 474.
11. Method for Determining the Etching Rate in Phosphate Glass Detectors / Burtebayev, N., Argynova, K., Chernyavskiy, M.M. et al. // *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 49, 350–355 (2022).

12. Features of Registration of Accelerated Heavy Ions by Phosphate Glass Detectors at Different Temperatures / N. Burtebaev [и др.] // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2022. — Апр. — Т. 134. — С. 528—532.
13. Exploration of Underground Structures in the Holy Trinity Danilov Monastery by Muon Radiography Method / N. Konovalova [и др.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. — 2021. — АВГ. — Т. 48. — С. 175—180.
14. Muography of the Cave Church of the Holy Dormition Pskovo-Pechersky Monastery / Alexandrov A. B. [и др.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. — 2023. — Т. 50. — №. 12. — С. 603-611.
15. A Noninvasive Muonography-Based Method for Exploration of Cultural Heritage Objects / A. Alexandrov [и др.] // Physics of Particles and Nuclei. — 2022. — Нояб. — Т. 53. — С. 1146—1175.
16. Исследование скрытых помещений Свято-Троицкого Данилова монастыря методом мюонной радиографии / А. Александров [и др.] // Ядер-ная физика. — 2021. — Янв. — Т. 84. — С. 496—501.
17. Recent developments in heavy-ion fusion reactions / Back B. B. [и др.]. //Reviews of Modern Physics. — 2014. — Т. 86. — №. 1. — С. 317-360.
18. Физика тяжелых ионов и ее приложения: Учебное пособие. / Оганесян Ю. Ц. [и др.] // — Издательский отдел, 2021. — №. JDS-2021-00200.
19. Phosphate glasses for identification of heavy ions / Price P. B., Cook L. M., Markert A. //Nature. — 1987. — Т. 325. — №. 6100. — С. 137-138.
20. A study of heavy ion tracks in phosphate glass detectors / Garg A. K., Kumar S., Sharma A. P. //International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes. — 1988. — Т. 39. — №. 2. — С. 109-111.
21. Track etching studies in phosphate glass detectors / Singh G., Kaur R., Virk H. S. //International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. — 1991. — Т. 19. — №. 1-4. — С. 655-656.
22. Science and technology with nuclear tracks in solids / Price P. B. //Radiation Measurements. — 2005. — Т. 40. — №. 2-6. — С. 146-159.
23. Application of Ag⁺-doped phosphate glasses as nuclear track etch detectors / Kodaira S. [и др.] // Radiation measurements. — 2014. — Т. 71. — С. 537-540.
24. Nuclear emulsion detectors for the muography of underground structure of Holy Dormition Pskov-Caves Monastery / Alexandrov A. [и др.] //Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — Т. 86. — №. 6. — С. 1095-1100.