

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук «ФИАН»

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., Полухина Наталья Геннадьевна

Москва 2025

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Фотографическая ядерная эмульсия	9
1.1 Ранний период применения технологии	11
1.2 Ключевые эксперименты с использованием ядерных эмульсий	15
1.3 Современные нейтринные эксперименты (CHORUS, DONUT, OPERA).....	20
1.4 Автоматизированные системы сканирования и крупномасштабное производство эмульсий	28
Глава 2. Имплементация новых технологий сканирования трековых детекторов	34
2.1 Модернизация сканирующего комплекса ПАВИКОМ-1	34
2.2 Модернизация сканирующего комплекса МІС-1	43
2.3 Новый алгоритм кластеризации.....	50
Глава 3. Разработка методики поиска редких событий распада сверхтяжелых ядер с помощью детекторов из фосфатного стекла.....	56
3.1 Химический состав использованных фосфатных стекол	58
3.2 Калибровочные измерения для стекла ГЛС-22	60
3.3 Определение толщины травленного слоя	65
3.4 Выбор травящего вещества	70
3.5 Алгоритм определения геометрических размеров треков многозарядных ядер	73
3.6 Калибровочные измерения для стекла КНФС-3.....	75
3.7 Исследование характеристик протравленных треков различных ионов	79
3.8 Параметрическая связь заряда ионов с измеряемыми характеристиками треков	85
Глава 4. Изучение скрытой внутренней структуры зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря методом мюнографии.....	89
4.1 Метод мюнографии	89
4.2 Описание эксперимента.....	91
4.3 Моделирование эксперимента	97
4.4 Сканирование ядерной эмульсии, реконструкция треков, интерпретация данных....	99

Заключение.....	106
Список литературы.....	108

Введение

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. Обычно для этого необходима 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 подобных экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий [1–4]. В трековых детекторах регистрация элементарных частиц сопровождается появлением наблюдаемых следов (треков), повторяющих траекторию движения элементарной частицы. Такая популярность трековых детекторов не случайна и обусловлена целым рядом их достоинств: наглядностью результатов эксперимента; относительной простотой и дешевизной; способностью накапливать информацию в течение длительного времени; высоким пространственным разрешением. Столь продолжительная жизнь методики, безусловно, связана с уникальным пространственным разрешением и возможностью разделения треков частиц. Ни один из применяемых сейчас детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое, в частности, дает ядерная эмульсия: 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. Разработка и интеграция новых модулей управления движением прецизионного столика микроскопа при автоматизированном сканировании;
2. Разработка и интеграция нового модуля в программном пакете для кластеризации треков в фотографической ядерной эмульсии;
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 данных, подтверждающих состоятельность выбранных технических решений в мюнографическом эксперименте по исследованию Свято-Троицкого Данилова монастыря на основе полученных угловых распределений потоков мюонов для известных архитектурных элементов.

Научная новизна:

1. Впервые разработаны новые аппаратные и программные модули для обработки эмульсионных пластин эксперимента SND@LHC на автоматизированном сканирующем микроскопе с диапазоном перемещения стола в горизонтальной плоскости 400 мм × 800 мм.
2. Разработан новый метод идентификации ионов в фосфатном стекле КНФС-3 на основе полученной экспериментально зависимости между скоростью изменения характеристик протравленных треков и зарядом частицы.
3. Для мюнографических измерений создана новая методика подтверждения состоятельности выбранных технических решений и достоверности полученных результатов на основе полученных угловых распределений потоков мюонов для известных архитектурных элементов здания церкви в Свято-Троицком Даниловом монастыре.

Практическая значимость. Разработанное программное обеспечение 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, уже 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 модернизация сканирующего комплекса M1C1 в лаборатории университета им. Федерико II, Неаполь позволила увеличить скорость сканирования двухсторонних эмульсионных пленок со 180 до 500 см² в час [8].

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 [9].

Инновационный неинвазивный метод мюнографии позволяет осуществлять исследование внутренней структуры историко-археологических объектов без проведения раскопок и без использования радиоактивных источников. Результаты первого в России современного успешного мюнографического эксперимента в Свято-Троицком Даниловом монастыре в полной мере продемонстрировали возможности мюнографии как уникального метода исследования с целью сохранения объектов культурного наследия. Разработанная автором методика подтверждения достоверности полученных мюнографических результатов позволила реализовать серию работ на промышленных объектах и на объектах культурного наследия [10–13]. Авторские мюнографические методические подходы и технические решения с использованием эмульсионных трековых детекторов открывают широкие перспективы для исследований в области археологии, геологии, ядерной энергетики, вулканологии, дефектоскопии и других областях на основе эффективного, экономичного и экологически безопасного метода мюнографии, используемого, в частности, с целью сохранения объектов культурного наследия и создания систем мониторинга проблемных объектов для минимизации последствий возможных природных и техногенных катастроф для населения, инфраструктуры и окружающей среды.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модернизированное аппаратное обеспечение автоматизированных сканирующих микроскопов ПАВИКОМ с имплементацией новых алгоритмов сканирования в программный пакет для обработки эмульсионных пластин эксперимента SND@LHC.

2. Методика идентификации тяжелых ионов в детекторах из фосфатного стекла КНФС-3 по геометрическим и динамическим характеристикам треков.
3. Идентификация видимых архитектурных элементов в мюнографическом исследовании здания в Свято-Троицкого Данилова монастыре.

Достоверность внедрения нового аппаратного и программного обеспечения подтверждается работоспособностью сканирующих станций, а также наличием результатов, подтвержденных при перекрестном сканировании на микроскопах в Неапольской Лаборатории Института ядерной физики Италии [13]. Результаты работы были опубликованы в международных рецензируемых журналах с высоким рейтингом. 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,
- ICHEPMMS-2024.

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. Автор принимал непосредственное активное участие в разработке программного обеспечения модуля управления прецизионным столом сканирующей станции MIC1 в Неаполе и в работе по созданию алгоритма кластеризации. Автором были выполнены работы по имплементации нового программного обеспечения и оборудования сканирующей станции ПАВИКОМ-1, а также экспериментальные исследования по использованию фосфатных стекол для регистрации осколков сверхтяжелых ядер и по мюнографии. Результаты, представленные к защите, получены при определяющем вкладе диссертанта.

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

1. 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>

2. 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>

3. 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>

4. 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>

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

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 119 страниц, включая 61 рисунок и 5 таблиц. Список литературы содержит 155 наименований.

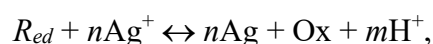
Глава 1. Фотографическая ядерная эмульсия

Фотографические ядерные эмульсии используются в экспериментальной физике более ста лет, с их помощью были получены важнейшие результаты и сделаны многие открытия в области физики элементарных частиц [6]. Среди всех детекторов, используемых в физике элементарных частиц, ядерно-эмульсионные детекторы до сих пор обладают самым высоким пространственным разрешением. Из-за трудоемкости и сложности визуальной обработки данных, полученных с помощью ядерных эмульсий, активность их использования в 80-х годах прошлого века была невысокой. Однако в последние несколько десятков лет эта проблема была решена благодаря достижениям в области цифрового считывания с помощью высокоскоростного автоматического сканирования. В частности, в настоящее время эмульсионные детекторы – лучшее решение для топологического обнаружения короткоживущих частиц и других задач в физике нейтрино и других развивающихся областях. В этой главе дано описание механизма образования трека заряженной частицы в эмульсии, представлена информация о первых и самых современных эмульсионных экспериментах, приведен краткий обзор истории создания автоматизированных сканирующих микроскопов.

Фотографическая ядерная эмульсия содержит большое количество мелких кристаллов галогенида серебра, равномерно диспергированных в желатине. Каждый кристалл современной стандартной ядерной эмульсии имеет характерный диаметр 200 нм [14].

Основной компонентой ядерной эмульсии является бромид серебра AgBr с небольшой долей йодида ($\text{AgBr}_{1-x}\text{I}_x$, где x – доля йодида, около нескольких молярных%). Кристаллическая структура AgBr в ядерных эмульсиях является гранцентрированной кубической, а ее форма – октаэдрической, как показано на рисунке 1.1. Кристалл AgBr имеет ширину запрещенной зоны 2,684 эВ. Когда заряженная частица проходит через кристалл, электроны из валентной зоны переносятся в зону проводимости. Благодаря неглубоким электронным ловушкам с энергией 21–25 МэВ электроны диффундируют внутри кристалла до тех пор, пока не будут захвачены в одном из центров чувствительности, расположенных на поверхности кристалла (электронный процесс). Центр чувствительности создается искусственно с помощью химической сенсibilизации (например, серой и золотом), и на начальной стадии заряжен положительно, работая как электронная ловушка. Захватив электрон, центр чувствительности меняет заряд на отрицательный, в результате чего он притягивает ионы серебра, мигрирующие в кристаллической решетке. Ион серебра реагирует с захваченным электроном и образует

один атом серебра ($\text{Ag}^+ + e \rightarrow \text{Ag}$, ионный процесс). Центр чувствительности снова заряжен положительно и готов к захвату электрона. Эти электронные и ионные процессы повторяются несколько раз, образуя совокупность атомов серебра $\text{Ag}_{n-1} + e + \text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}_n$ и повышая ее энергетический уровень. Энергетический уровень агрегата, равный Ag_4 или превышающий его, достаточно глубок, чтобы быть “проявляемым”, и центр чувствительности на этой стадии называется “скрытым центром изображения”. Этот сигнал химически усиливается во время процедуры проявления. Эмульсионная пленка пропитывается проявляющим раствором, а именно восстановительным химическим веществом. Повторение электронных и ионных процессов продолжается до тех пор, пока все кристаллы не восстановятся. Реакция выражается следующим образом:



где Red и Ox – проявляющий агент и окисленный проявляющий агент, соответственно; n – количество ионов, а m – количество образовавшихся протонов. Таким образом, металлическая “серебряная нить” остается на месте кристалла со скрытым центром изображения, тогда как кристаллы без скрытых центров изображения остаются неизменными. Коэффициент усиления при таком увеличении очень высок, $O(10^8)$. После вымывания оставшихся кристаллов AgBr с помощью процедуры закрепления треки частиц готовы к наблюдению под микроскопом, как показано на правом изображении на рисунке 1.1.

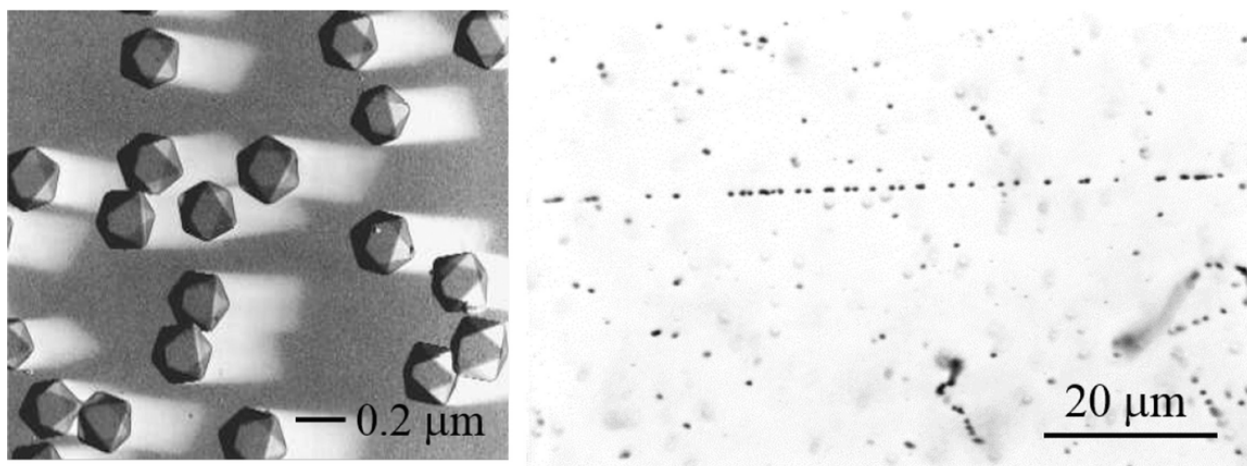


Рисунок 1.1 – Слева: кристаллы бромида серебра (линейный размер 0,2 мкм), видимые с помощью электронного микроскопа. Справа: след, оставленный минимальной ионизирующей частицей (10 ГэВ π^-) в ядерных эмульсиях; обнаружено около 36 зерен на 100 мкм. Комптоновские электроны с энергией приблизительно 100 кэВ также видны в правом нижнем углу изображения

Эффективность обнаружения монокристаллом минимально ионизирующих частиц (MIP) составляет около 0,17 [15]. Чувствительность ядерных эмульсий выражается в

количестве зерен на единицу длины. Типичная эмульсия имеет чувствительность 30–50 зерен на 100 мкм вдоль траектории частиц для минимально ионизирующей частицы. Помимо размера кристаллов и химической чувствительности, чувствительность зависит от объема кристаллов AgBr по отношению к общему объему эмульсионного слоя, который колеблется от 30 до 55%. Количество зерен пропорционально ионизации, производимой частицей, что позволяет измерять локальные энергетические потери (dE/dx). Случайный фон, так называемая “вуаль”, возникает как следствие теплового фона, наличия примесей и повышенной чувствительности. Плотность фоновой вуали < 5 зерен/10 мкм куб. считается приемлемой.

Слои ядерной эмульсии толщиной 10–300 мкм наносятся на стеклянную или пластиковую основу. Для регистрации частиц высоких энергий (> 100 МэВ) в основном используется эмульсионная пленка с двухсторонним покрытием пластиковой основы толщиной 200 мкм эмульсионными слоями толщиной 50 мкм. Чтобы сканировать оба слоя эмульсии на пластиковой основе с помощью оптических микроскопов, материал пластиковой основы не должен обладать двойным преломлением (триацетилцеллюлоза или полиметилметакрилат). Двухсторонние эмульсионные пленки с кристаллами диаметром 200 нм и толщиной основы 200 мкм позволяют получить угловое разрешение порядка 0,35 мрад [16].

Эмульсионные детекторы могут быть объединены с электронными детекторами для добавления информации о времени пролета и/или идентификации зарегистрированных частиц, образуя гибридные детекторные системы. Эмульсионные детекторы обеспечивают большое разнообразие возможностей для гибридных детекторных систем, в зависимости от физических задач. После химической проявки эмульсий их сканирование и первичная обработка данных в реальном времени выполняется на автоматизированных высокотехнологичных микроскопах, что имеет фундаментальное значение в современных экспериментах, использующих большие объемы ядерных эмульсий.

1.1 Ранний период применения технологии

Первыми успешными примерами использования фотографического метода являются открытие радиоактивности Беккерелем в 1896 году [17] и измерения Киношиты [18], который с помощью оптических микроскопов в 1910 году обнаружил треки альфа-частиц в ядерной эмульсии. Технология эмульсионных детекторов получила значительное развитие в 1930-х и 1940-х годах благодаря работам группы Бристольского университета во главе с Пауэллом [19].

В исследованиях с эмульсионными детекторами толщина слоев варьировалась от 50–100 мкм до 600–1000 мкм. В 1950 году сообщалось об исключительной попытке обработки эмульсии толщиной 2000 мкм [20]. Однако, с увеличением толщины обработка эмульсий существенно затруднялась из-за большего рассеяния света и потери оптической контрастности.

В 1952 г был разработан новый подход, при котором эмульсионные пластины располагались парами с эмульсионными слоями, обращёнными «лицом к лицу», что удваивало эффективную толщину эмульсионного слоя [21]. Как только была изготовлена партия пластин, эмульсии отделяли от стекла и упаковывали вместе, образуя почти твердую чувствительную массу, получившую название *stack*. После выдержки эмульсии погружали в раствор глицерина с желатином, а затем приклеивали к специально подготовленным стеклянным пластинам. Использование рентгеновских меток определяло систему отсчета для последовательного прослеживания треков в слоях эмульсии. Метод работы с такими «очищенными» эмульсиями позволил внести заметный вклад во многие эксперименты того времени [6].

Технология изготовления эмульсионных слоев непрерывно развивалась, параллельно проводилась разработка специальных микроскопов для наблюдения и измерения следов частиц. С помощью эмульсионных детекторов, облученных в 1947 г на аэростате космическими лучами, Пауэлл открыл пионы [22; 23]. Картина распада заряженного пиона с образованием мюона, зарегистрированного в ядерной эмульсии, показана на рисунке 1.2. За свое открытие, ставшее возможным благодаря использованию ядерной эмульсии, Пауэлл был удостоен Нобелевской премии по физике за 1950 год. В заключении Нобелевского комитета подчеркивалась простота экспериментального аппарата, использованного в этом открытии.

В 1955 году с помощью ядерных эмульсий были идентифицированы экзотические гиперядра [6]. В ходе эксперимента на аэростате в 1960 году 70-литровая эмульсионная камера под названием “Bloury Stack” облучалась космическими лучами для изучения их природы и особенностей взаимодействий [6].

Крупным прорывом в эмульсионной технологии стало внедрение так называемой «эмульсионной облачной камеры» (Emulsion Cloud Chamber, ECC) [25]. С появлением ECC произошло радикальное изменение концепции эмульсионного детектора, получившего высокое пространственное разрешение и возможность трехмерной реконструкции событий. ECC представляет собой сборку эмульсионных пленок, чередующихся со слоями пассивного материала, обычно пластиковых или металлических пластин, причем плоскость эмульсионных пленок обычно перпендикулярна потоку падающих частиц. В таком

детекторе треки заряженных частиц восстанавливаются с пространственным разрешением порядка 1 мкм.

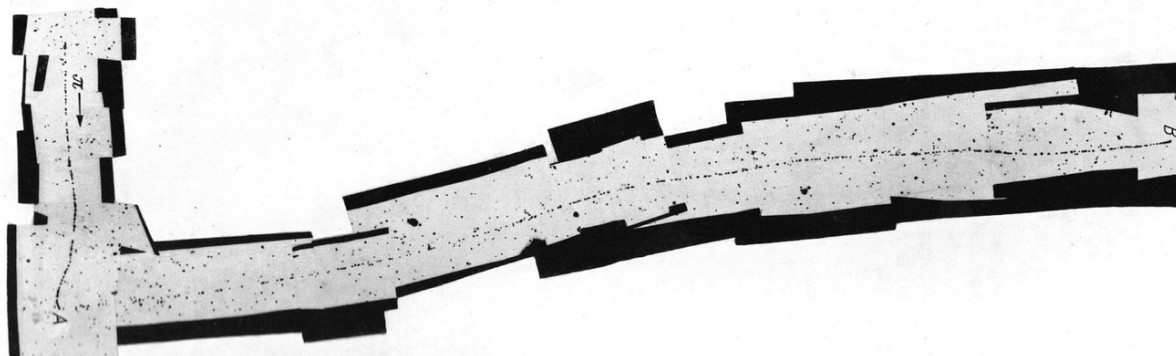


Рисунок 1.2 – Микрофотография распада $\pi \rightarrow \mu$, взятые из [15]

Этот тип детектора был предложен Капланом и использовался для исследования частиц первичного космического излучения [24]. Детекторы ЕСС широко применялись для изучения спектров космических лучей и процессов взаимодействия при высоких энергиях. Нишимура, в частности, предложил метод анализа каскадных ливней в ЕСС для измерения энергии высокоэнергичных γ -квантов [25].

Ниу разработал двухсторонние эмульсионные пленки, в которых чувствительный эмульсионный слой наносится с обеих сторон пластиковой основы [26]. Для этой цели компания FUJI разработала специальную пластиковую плёнку толщиной 800 мкм, позволяющую наносить на нее гель с обеих сторон. Толщина эмульсионных слоев составляла 50 мкм. При разработке новой конструкции пленки необходимо было решить две проблемы: наличие пластиковой основы с оптическими свойствами, совместимыми с оптическими свойствами ядерных эмульсий, и создание объектива высокой мощности с рабочим расстоянием более 1 мм. Первая проблема была решена с помощью материала (люцита): компания FUJI разработала специальную плёнку толщиной 800 мкм, позволяющую наносить на нее с обеих сторон слои эмульсионного геля толщиной 50 мкм. Использование пластиковой основы между двумя слоями эмульсии позволяет с высокой точностью измерить угол наклона трека, соединяя проявленные зерна, находящиеся ближе всего к основе. При указанной толщине пластиковой основы угловое разрешение достигает 1 мрад. Вторая проблема была решена благодаря объективу, созданному компанией Tiyoda Optical Co.

Концепция ЕСС открыла путь к серии важных экспериментов большого масштаба благодаря использованию плотных металлических пластин, позволяющих создавать детекторы большой массы с беспрецедентным пространственным разрешением. В

частности, в эксперименте на горе Чакалтайя ЕСС использовались для изучения результатов взаимодействий космических лучей высоких энергий (> 10 ТэВ) с атмосферой путём регистрации центральной части широких атмосферных ливней [27]. Аналогичная методика применялась в крупномасштабном эксперименте на горе Фудзияма [28]. Спектры тяжелых ионов первичного космического излучения (1000 ТэВ и более) изучали с помощью рентген-эмульсионных камер в экспериментах RUNJOB [29] и JACEE [30].

Методы анализа событий в ЕСС основаны на реконструкции всех треков, исходящих из точки первичного взаимодействия, чаще всего происходящего в пассивном материале. Пространственные углы измеряются для всех сегментов трека. Реконструкция и идентификация ливня (электромагнитного или адронного) может быть выполнена на основе его топологических особенностей. Таким же образом можно реконструировать распады частиц. В дополнение к топологическим исследованиям, с помощью детекторов ЕСС можно проводить кинематический анализ, используя процессы многократного кулоновского рассеяния и ионизации, что позволяет определить величину импульсов частиц и провести их идентификацию.

Примером является открытие профессором Ниу так называемых X-частиц в 1971 году [31]. На рисунке 1.3 показана схема события, в котором две заряженные частицы, образовавшиеся при взаимодействии космических лучей, демонстрируют топологию распада с изломом. Сегодня известно, что это событие относится к образованию и распаду очарованных мезонов.

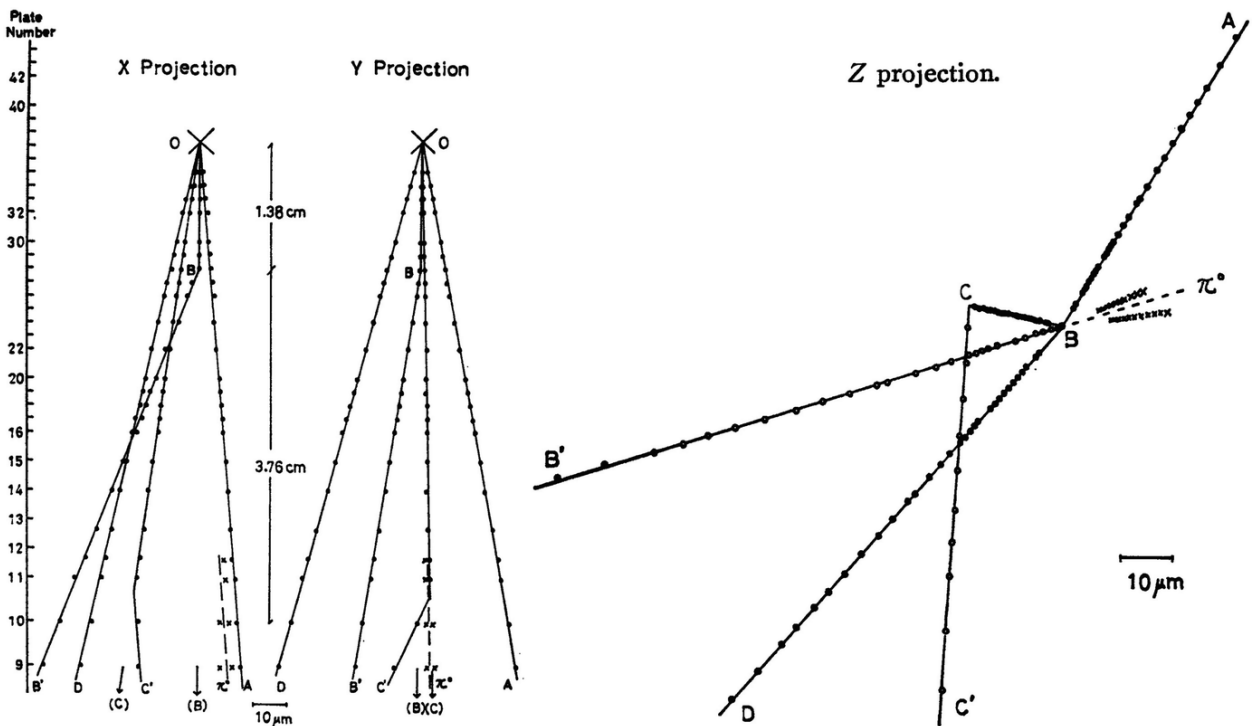


Рисунок 1.3 – Схематический рисунок первых свидетельств образования и распада

короткоживущих “Х-частиц” (очарованных мезонов) при взаимодействии космических лучей

Детекторы ЕСС позволили разработать гибридные эксперименты, сочетающие эмульсионные и электронные детекторы, причем последние в основном использовались для получения целеуказания. В первых гибридных экспериментах для считывания треков в эмульсии применялись полуавтоматические видеокамеры. Компьютеры использовались только для оказания помощи оператору при измерении координат треков и для обеспечения микрометрического перемещения столика микроскопа. Координатное совмещение пленок выполнялось с помощью рентгеновских меток в сочетании с точной фиксацией положения краев пленок. Типичная толщина двухсторонней эмульсионной пленки составляла 1 мм или больше, что позволяло отслеживать треки под заданным углом к плоскости эмульсии путем изменения фокальной плоскости линз объектива. Видеокамера использовалась для получения изображения с объектива, что представляло собой весьма трудоемкую процедуру. Оператору приходилось вручную настраивать видеоизображение на визуально обнаруженном треке, в то время как темные пятна – засвеченные блябы в эмульсии – могли бы обнаруживаться автоматически. Графическим устройством при измерении положения трека и углов его наклона служил экран телевизора.

Механическая стабильность сборки ЕСС обеспечивалась вакуумной упаковочной бумагой, известной как “оригами”, которая также служила для изоляции эмульсионных пленок от света, влажности и загрязнений. Связь между ЕСС и электронными детекторами достигалась путем «сшивки» треков, точность которой зависит от энергии частиц, поскольку частицы большей энергии меньше отклоняются в результате многократного кулоновского рассеяния. В этом отношении очень эффективной оказалась идея использования интерфейсных эмульсионных пластин между модулем ЕСС и электронными детекторами. Эти интерфейсные пленки были названы сменными листами CS (Changeble Sheet), потому что их часто заменяли во время физического прогона, чтобы ограничить интеграцию фоновых треков и идентифицировать треки, обнаруженные в электронных детекторах. Эта концепция была впервые применена в эксперименте E531 в Fermilab [32], и активно используется в настоящее время.

1.2 Ключевые эксперименты с использованием ядерных эмульсий

В 1970-х годах были разработаны более сложные эмульсионные детекторы повышенной массы для применения в экспериментах на ускорителях частиц в составе гибридных установок, включающих также электронные детекторы. Эмульсии обычно

используются в качестве мишеней с высоким пространственным разрешением, а электронные детекторы (трекеры, калориметры и спектрометры) - для предварительного отбора событий в эмульсиях и для получения дополнительной информации об их кинематике.

В ранних экспериментах на ускорителях ядерные эмульсии использовались в сочетании с искровыми и пузырьковыми камерами, что позволяло сократить общее время сканирования. Например, так было выполнено наблюдение распада очарованной частицы, возникшей при взаимодействии нейтрино высокой энергии в эксперименте CERN-WA-017 [33]. В 1977 году в ЦЕРН был проведен поиск очарованных частиц во взаимодействиях нейтрино с помощью ядерных эмульсий, размещенных перед входным окном Большой европейской пузырьковой камеры (BEBC) [34], заполненной жидким водородом и помещенной в магнитное поле 3,5 Тл. Стопка эмульсий была собрана из 3150 пленок производства ILFORD толщиной 600 мкм каждая. Было проведено “поверхностное” сканирование эмульсий стопки с помощью объективов 200^x и 300^x, центрированное на прогнозируемом положении вершины 5×31 мм² для 7 пластин. Было проанализировано в общей сложности 206 000 изображений BEBC, что привело к обнаружению 935 вершин взаимодействия нейтрино в эмульсии, 523 из которых были идентифицированы как события взаимодействий нейтрино по каналу заряженного тока. После кинематического и топологического анализа было отобрано 169 взаимодействий по каналу заряженного тока, 8 из которых были идентифицированы как рождение очарованных частиц во взаимодействиях нейтрино. В эксперименте сообщалось о первом прямом наблюдении очарованного распада бариона [35] и нейтральной очарованной частицы [36].

В 1978 году в лаборатории Fermilab был поставлен эксперимент E531 для изучения свойств очарованных частиц и механизма их рождения в нейтринных взаимодействиях [6]. Активная нейтринная мишень была изготовлена из ядерных эмульсий, в которых короткоживущие частицы обнаруживались с точностью до микрона. Продукты их распада регистрировались с помощью электронного спектрометра, что сделало E531 первым гибридным экспериментом в физике элементарных частиц. 3886 взаимодействий нейтрино были локализованы в объеме мишени; 122 события имели вторичную вершину в мишени, 119 из них были вызваны нейтрино и 3 – антинейтрино. События с потенциальным очарованным адроном в конечном состоянии были детально изучены, что позволило обнаружить присутствие сильно ионизирующих частиц (барионов) и полностью реконструировать кинематику в вершине распада. Среди этих событий 57 были классифицированы как кандидаты на D^0 .

После открытия b -кварка в 1977 году [37] эксперименты с ядерными эмульсиями были направлены на непосредственное наблюдение образования и распада барионов. Их успешный поиск был впервые проведен в эксперименте WA75 в ЦЕРН с использованием пучка пионов с энергией 350 ГэВ [38]. 801 образец ядерной эмульсии в виде двухсторонних пластин и «очищенных» пленок был экспонирован в 1983 и 1984 гг. Стопки эмульсии были размещены как параллельно, так и перпендикулярно пучку таким образом, чтобы использовались преимущества обоих подходов: эмульсии, расположенные перпендикулярно пучку в вертикальном положении выдерживали более высокую интенсивность облучения, а эмульсии, размещенные параллельно пучку, более эффективно регистрировали короткоживущие частицы. По результатам измерений в эмульсиях было обнаружено одно взаимодействие пиона с рождением пары бьюти-частиц B^- и B^0 [39], каждая из которых также распадалась в эмульсии с образованием очарованных частиц (см. рисунок 1.4).

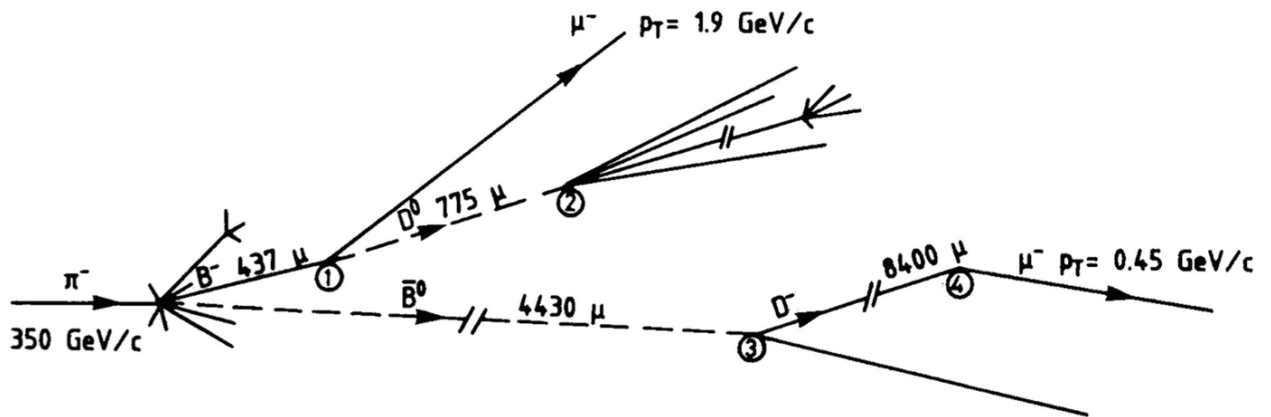


Рисунок 1.4 – Схема взаимодействия пиона в эмульсии с рождением пары бьюти-частиц B^- и B^0 в эксперименте WA75

Эксперимент E653 в Fermilab [40] проводился с целью измерения времени жизни бьюти-частиц и очарованных адронов. Этот детектор был расширенной модификацией гибридной технологии с использованием ядерной эмульсии, разработанной для эксперимента E531, и был оптимизирован для адронного пучка. Для увеличения надежности выделения событий в условиях большого фона за эмульсионным детектором был установлен электронный спектрометр высокого разрешения. Для обработки больших объемов экспериментальных данных потребовалось создание новых методов компьютерного анализа [41]. Для поиска в эмульсии были выбраны события с мюоном с большим поперечным импульсом ($p_{\perp} > 1,5 \text{ GeV}/c$) в конечном состоянии, зарегистрированным в спектрометре. Для получения очарованных частиц в первом эксперименте в 1985 году использовался протонный пучок с энергией 800 ГэВ. Во втором эксперименте в 1987 году для изучения бьюти-частиц – пучок отрицательных пионов с

энергией 600 ГэВ. Использовались два типа мишенных модулей, вертикальные и горизонтальные. В первом эксперименте вертикальные модули облучались с интенсивностью $1,5 \times 10^5$ протонов/см², а горизонтальные – с интенсивностью $0,8 \times 10^5$ протонов/см²; во втором – $3,0 \times 10^5$ пионов/см² и $1,0 \times 10^5$ пионов/см² соответственно.

При обработке эмульсионных данных сначала производился поиск первичной вершины взаимодействия. Всего было отобрано 6542 события, и для всех, кроме 9, первичная вершина была найдена с использованием показаний электронных детекторов. Большинство событий были исключены из рассмотрения из-за требования строгого углового соответствия (2 мрад для треков с уклоном в пределах 40 мрад) между реконструированным треком в спектрометре и любым треком, выходящим из первичной вершины. В 359 событиях, в которых мюон выходил не из первичной вершины, производился поиск вторичной вершины. Девять событий соответствовали критериям отбора для bottom кварка [42]. С помощью алгоритма максимального правдоподобия, который учитывал разрешение по импульсу для каждого события и относительную эффективность регистрации в эмульсии была получена оценка времени жизни для 6 заряженных и 12 нейтральных бьюти-частиц.

В конце 1980-х годов ожидалось, что образование очарованных частиц из кварк-глюонной плазмы будет отличаться от такового в протон-ядерных взаимодействиях [43], следствием чего могло быть значительное увеличение выхода пар очарованных кварков. С экспериментальной точки зрения, основная трудность для обнаружения очарованных частиц в таких процессах заключалась в очень коротком пробеге до распада в области, близкой к первичному взаимодействию, где плотность частиц чрезвычайно высока. В ЦЕРН были проведены два исследования с использованием ядерных эмульсий, одно в рамках программы NA34/2 emulsion-HELIOS [44], а другое – в рамках сотрудничества EMU09 [45]. В NA34 было зафиксировано рождение очарованных частиц во взаимодействиях ядра ¹⁶O с энергией 200 ГэВ/нуклон в эмульсии и измерено поперечное сечение процесса.

С целью изучения рождения очарованных частиц в центральных взаимодействиях ядер ³²S с энергией 200 ГэВ/нуклон церновская коллаборация EMU09 разработала гибридный детектор с ядерной эмульсией. Гибридная конструкция предназначалась для уменьшения фона от вторичных взаимодействий в эмульсии, которые были фоновыми событиями для более тяжелых ядер. Скорость анализа эмульсионных данных в то время не позволила накопить достаточно большую статистику таких редких событий для получения убедительного результата.

Основным направлением исследований в церновском эксперименте EMU-15 было изучение коллективных эффектов и особенностей разлета вторичных частиц в столкновениях ядер атомов свинца, ускоренных до энергий 32 ТэВ/ядро, с атомами свинца мишени. Эксперимент был осуществлен в 1996 году на пучке SPS в ЦЕРН. Коллаборация EMU-15 состояла только из российских участников и, в этом отношении, была и остается уникальной для ЦЕРН [46].

Эмульсионная камера эксперимента EMU-15 имела форму цилиндра и состояла из тонкой (толщиной 400 мкм) свинцовой мишени и 38 слоев ядерной эмульсии российского производства, каждый толщиной 50 мкм, политых на основу толщиной 25 мкм. Один слой ядерной эмульсии располагался непосредственно перед свинцовой мишенью, остальные – за ней. При облучении ускоренными ядрами атомов свинца камеры помещались в поперечное магнитное поле напряженностью 2 Тл и располагались таким образом, чтобы плоскости свинцовой мишени и ядерных эмульсий были перпендикулярны пучку. Число ядер при облучении каждой камеры составляло около 10^4 частиц. В каждой камере было найдено приблизительно 10 центральных Pb-Pb взаимодействий с множественностью более 10^3 вторичных частиц (критерием отбора центрального события служит большая множественность вторичных заряженных частиц и отсутствие фрагментов с $Z \geq 2$). Анализ распределения в фазовом пространстве образовавшихся вторичных частиц составлял основную задачу исследования, так как позволял сделать заключение о динамике процесса. Из-за большой множественности задача представлялась весьма трудоемкой, даже если измерять только углы вылета частиц (полярный и азимутальный), и сводилась к распознаванию образов, созданных на плоскости мишенной диаграммы большим количеством точек. Для обработки этих экспериментальных данных впервые в России был создан программный пакет для автоматизированной обработки ядро-ядерных взаимодействий с энергией 158 ГэВ/нуклон при поперечном облучении тонкослойных эмульсий и, впервые в физике высоких энергий, специальный интерфейс для применения математического метода вейвлет-анализа [47]. В приведенном в работе [47] событии Pb-Pb взаимодействия в эксперименте EMU-15 при энергии соударения, в 160 раз превышающей их массу покоя. Было обнаружено (помимо ожидаемых струй и министруй) характерное кольцевое расположение некоторой подсистемы частиц в мишенной плоскости. Обнаружение подобных структур вызвало значительный интерес, поскольку они могли быть свидетельством нового механизма [48] в сильных взаимодействиях, связанного с глюонным аналогом черенковского излучения фотонов.

Ядерные эмульсии также сыграли важную роль в изучении многокварковых систем и аспектов КХД, связанных с удержанием кварков. Эксперимент E176 с гибридной

эмульсионной мишенью [49] был проведен на ускорителе КЕК (Япония) с использованием K^- пучка с энергией 1,66 ГэВ/с для изучения ядер двойной странности, образующихся при захвате Ξ^- -гиперона в состоянии покоя. Родившийся во взаимодействии $K^- p \rightarrow K^+ \Xi^-$ гиперон Ξ^- в состоянии покоя может быть захвачен в процессе $\Xi^- p \rightarrow \Lambda \Lambda$. В гипотезе о существовании Н-дибариона (ssuudd) двойное гиперядро Λ может распадаться, испуская Н-дибарион, который, в свою очередь, распадается на $\Sigma^- p$ менее чем в 1 мм от точки остановки Ξ^- . В отличие от первых экспериментов с эмульсиями, в которых пучками K^- облучались только ядерные эмульсии [50], гибридный дизайн позволил идентифицировать K^+ -мезон и накопить достаточную статистику. Были обнаружены три кандидата в гиперядра с двойным Λ [50]. С целью изучения взаимодействия Λ - Λ в эксперименте E373 в КЕК [52] был проведен поиск ядер $S = -2$ в ядерной эмульсии с более высокой статистикой. В эксперименте сообщалось о наблюдении двойных гиперядер, и было измерено сечение взаимодействия Λ - Λ [52]. Запланированы эксперименты на новой адронной установке ускорительного комплекса J-PARC, где по-прежнему используется технология гибридного детектора с набором эмульсионных пластин [53].

1.3 Современные нейтринные эксперименты (CHORUS, DONUT, OPERA)

В начале 1990-х для исследований процессов осцилляции нейтрино было предложено использовать гибридные детекторы с применением эмульсий с высоким пространственным разрешением, подходящих для изучения топологий короткого распада (charm, τ) с возможностью полной реконструкции кинематики события. Этот подход был мотивирован прогрессом автоматизированного сканирования эмульсий, который позволил сократить время анализа эмульсионных данных на порядки.

Детектор эксперимента CHORUS [54] является примером большой гибридной экспериментальной установки, сочетающей ядерно-эмульсионную мишень с электронными детекторами. Эксперимент был разработан для поиска осцилляций $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ в пучке нейтрино в ЦЕРН. Поскольку очарованные частицы и τ -лептон имеют примерно одинаковое время жизни, детектор также хорошо подходил для наблюдения за образованием и распадом очарованных частиц.

В CHORUS ядерные эмульсии использовались и как нейтринная мишень и как детектор с высоким пространственным разрешением, позволяя проводить трехмерную реконструкцию событий с короткоживущими частицами. Эмульсионная мишень имела беспрецедентно большую массу 770 кг и была разделена на четыре стопки из восьми модулей, каждый из которых, в свою очередь, состоял из 36 пластин размером 36×72 см².

CHORUS стал важной вехой в развитии эмульсионной технологии с точки зрения размера мишени и использования CS. Особенностью эксперимента стали трудности, связанные с необходимостью производства и обработки больших объёмов ядерной эмульсии: трудоемкие процедуры производства эмульсионного геля и полива его на пластиковую основу, реализованные в ЦЕРН [55], а также первое массовое использование автоматизированных сканирующих микроскопов, появившихся к тому времени в японских и европейских лабораториях коллаборации [54].

Крупногабаритная эмульсионная мишень была заменена только один раз за все время эксперимента, в то время как слои CS периодически заменялись новыми. Временное разрешение обеспечивали электронные детекторы. При сканировании CS осуществлялся поиск треков с пространственным положением и углами, совместимыми с предсказаниями электронных треков. Если соответствующие треки обнаруживались в CS, их поиск проводился во всех эмульсионных слоях мишени до точки исчезновения трека с помощью процедуры, называемой обратным сканированием, заключающейся в постепенной сшивке треков в слоях эмульсии по направлению к вершине взаимодействия. После этого выполнялось “сканирование объема” (net-scan) вокруг предполагаемой вершины, и процедура повторялась для всех треков до тех пор, пока не обнаруживали вершину взаимодействия нейтрино.

При поиске очарованных распадов частиц к собранным данным сетевого сканирования была применена специальная топологическая выборка. Процедура анализа была дополнена визуальным осмотром выбранных кандидатов событий, направленным на проверку как первичных, так и вторичных вершин.

В эксперименте CHORUS было обнаружено более 100 000 взаимодействий нейтрино. Поиск осцилляций «на короткой длине» (800 метров до детектора) не был успешным, поэтому основным результатом стало определение верхнего предела вероятности осцилляций [54]. CHORUS сообщил о первом наблюдении очарованных частиц во взаимодействиях по каналу заряженного тока [56]; первое зарегистрированное событие схематично показано на рисунке 1.5. Схема демонстрирует образование двух очарованных частиц во взаимодействии мюонного нейтрино по каналу заряженного тока. В вершине первичного нейтринного взаимодействия образуются два трека от заряженных частиц, один соответствует отрицательному мюону, а другой, обозначенный как частица 1, очарованному адрону. Трек заряженной очарованной частицы длиной 1010 мкм имеет угол излома 417 мрад. Вылетающая частица, обозначенная как частица 2, имеет трек длиной 7560 мкм и повторное взаимодействие с сильно ионизирующей частицей 3. В дополнение к заряженному очарованному адрону виден распад нейтральной очарованной частицы на

расстоянии 340 мкм от первичной вершины. В результате распада нейтральной частицы образуются две частицы, некомпланарность родительской и дочерней частиц исключает гипотезу K_s^0 и Λ . Кинематический анализ подтвердил интерпретацию события как образование очарованной частицы, индуцированное мюонным нейтрино при взаимодействии по каналу заряженного тока [56]. В эксперименте была набрана беспрецедентная статистика примерно по 2000 полностью реконструированным вершинам событий очарованного адрона, вызванных нейтрино. Используя эту статистику, CHORUS измерил поперечное сечение эксклюзивного рождения Λ_c и D_0 [57]. Эмульсионные данные CHORUS обозначили верхний предел образования очарованных пентакварковых состояний [58].

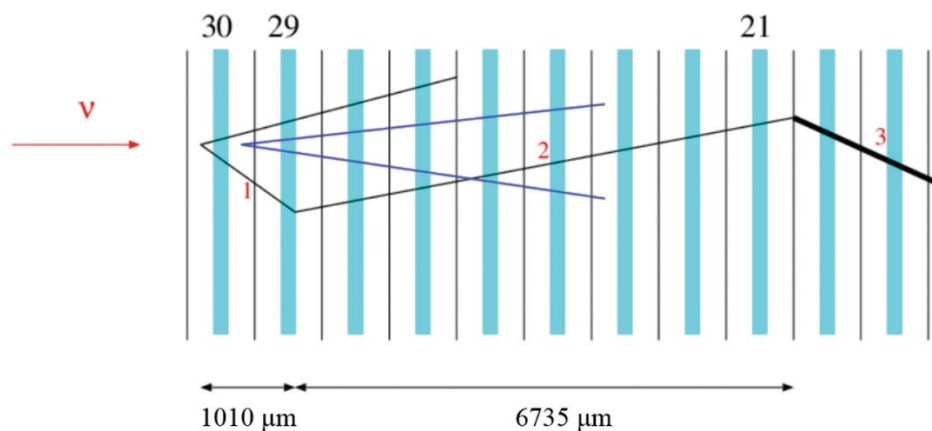


Рисунок 1.5 – Схематический рисунок первого нейтринного события рождения чарма, наблюдаемого в эмульсиях эксперимента CHORUS

Целью эксперимента DONUT в Fermilab было первое прямое обнаружение взаимодействий тау-нейтрино, полученного при сбросе протонного пучка с энергией 800 ГэВ и не связанного с возможным механизмом осцилляций, как в CHORUS [59]. В эксперименте DONUT использовалась мишень ЕСС из слоев железа и эмульсии, обеспечившая достаточно большую массу детектора для взаимодействия нейтрино и обнаружение вершины взаимодействия, а также четкое наблюдение короткого следа τ лептона (размером до нескольких мм), образующегося во взаимодействии ν_τ по каналу заряженного тока. ЕСС была дополнена высокоточными волоконными трекерами для алгоритма обратного сканирования.

При анализе эмульсионных данных эксперимента было обнаружено 203 взаимодействия нейтрино, из них 4 события-кандидата на взаимодействие ν_τ с оценочным фоном в 0,34 события [60]. На рисунке 1.6 показаны схемы двух событий-кандидатов на прямое обнаружение ν_τ . В конечном счете, из общего количества 578 наблюдаемых взаимодействий нейтрино было обнаружено 9 событий с ν_τ по каналу заряженного тока с

оценочным фоном в 1,5 события; они были впервые использованы для оценки поперечного сечения взаимодействия ν_τ (CC) [61].

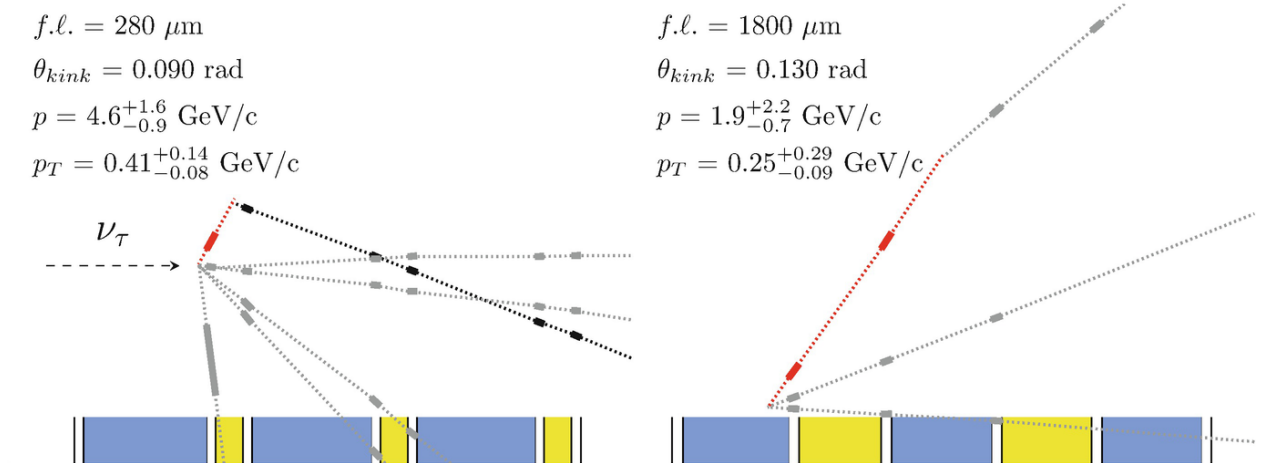


Рисунок 1.6 – Схематическое изображение двух событий, вызванных ν_τ , зарегистрированных в эксперименте DONUT. Видны перегибы, связанные с распадом τ

Первым экспериментом «на появление» при поиске осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ стал эксперимент OPERA, все предшествующие эксперименты были экспериментами на «исчезновение» нейтрино (мюонных нейтрино, например [62]), в экспериментах на ускорителях [63] и многих других. Появление тау-нейтрино в практически чистом пучке мюонных нейтрино, регистрация которого была целью эксперимент OPERA, стало недостающим звеном в понимании когерентного сценария смешивания нейтрино.

Концептуальный план эксперимента был предложен в работах [64–66], а детектор подробно описан в работах [67; 68]. Отличительной особенностью взаимодействия ν_τ (CC) является образование короткоживущего τ лептона ($c_\tau = 87$ мкм). Таким образом, необходимо было решить очень сложную задачу по обнаружению субмиллиметровых топологий τ -распада на огромном фоне ν_μ -реакций в мишени массой более килотонны. В OPERA эта проблема была решена путем использования технологии ЕСС.

Эксперимент OPERA проводился с 2008 по 2012 год в подземной лаборатории LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso) в Италии, в 730 км от ЦЕРН, откуда направлялся нейтринный пучок. OPERA — это первый крупномасштабный эксперимент с эмульсией, в котором были использованы все существовавшие на то время технологические достижения в области эмульсионной технологии и систем сканирования. Для наглядности можно сказать, что мишень ЕСС изготовлена из пленок общей площадью 110000 м² и свинцовых пластин площадью 105000 м². Сканирование эмульсий проводилось с помощью около 40 полностью автоматизированных микроскопов, каждый из которых был примерно на два порядка быстрее, чем те, что использовались в эксперименте CHORUS [69].

Мишень ЕСС состояла из многослойных блоков стенок-мишеней, чередующихся парами плоскостей из пластиковых сцинтилляционных полосок и эмульсионных плёнок. Стенка-мишень (с поперечным сечением около $10 \times 10 \text{ м}^2$) представляла собой набор горизонтальных лотков, каждый из которых был заполнен блоками-мишенями ЕСС, называемыми кирпичами. Кирпич состоял из 57 светонепроницаемо упакованных эмульсионных пленок, чередующихся с 56 свинцовыми пластинами толщиной 1 мм. Размеры кирпича составляли $128 \times 102 \times 79 \text{ мм}^3$ при весе 8,3 кг (рис. 11). К нижней стороне каждого кирпича были прикреплены сменные листы CS. Геометрия CS была выбрана таким образом, чтобы собрать две смежные эмульсионные пленки в виде дублета, прикрепленного в виде независимой съемной упаковки к нижней поверхности кирпича (рис. 11). Использование дублетов обеспечило отмену случайных совпадений треков, накопленных при хранении и транспортировке эмульсионных плёнок и не исчезнувших в процессе «рефрешига».

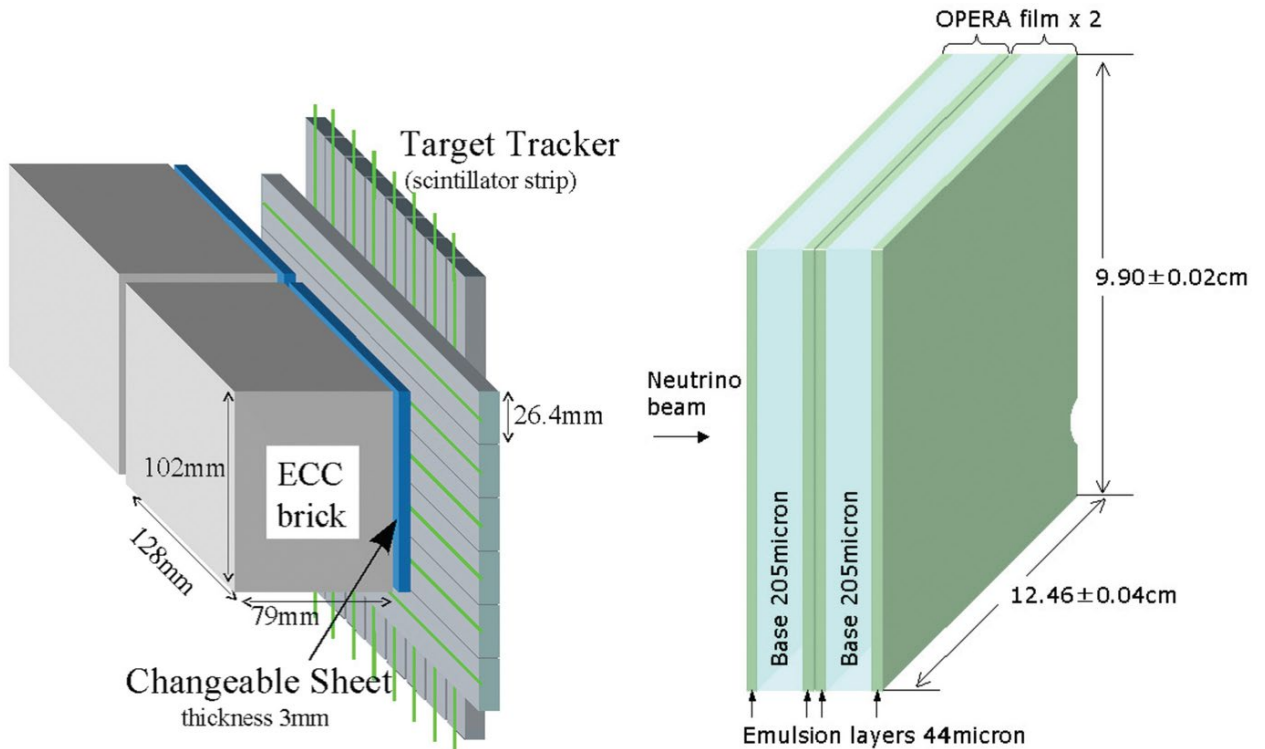


Рисунок 1.7 – Схематический вид блока ЕСС (кирпича), использованного в эксперименте OPERA. Также показана деталь сменного листового дублета

Всего было изготовлено 150 000 кирпичей массой 1,25 тонны. Таким образом, детектор OPERA стал самым крупный из когда-либо существовавших детекторов ЕСС (по масштабу производства эмульсионных пленок, проявки и анализа эмульсий с точки зрения мощности сканирования). Было произведено более девяти миллионов эмульсионных пленок, из которых с помощью полностью роботизированной цепочки по сборке пленок и свинцовых пластин в подземной темной комнате LNGS были собраны 150000 кирпичей. В

LNGS также была создана обширная инфраструктура для манипулирования кирпичами (автоматическое извлечение из матрицы-мишени), рентгеновской маркировки, облучения космическими лучами и проявки эмульсий [70].

Принцип эксперимента можно кратко изложить следующим образом. При взаимодействии нейтрино возникающие треки заряженных частиц регистрировались в плоскостях сцинтиллятора, расположенных за каждой стенкой мишени. Реконструкция “оси пучка”, или идентификация проникающего следа (например, мюона), позволяла идентифицировать участок, где была вероятность обнаружить взаимодействие нейтрино. Соответствующий кирпич извлекался из стены, прикрепленный дублет CS снимался и проявлялся, в то время как еще упакованный в светонепроницаемую оболочку кирпич помещался в подземное хранилище в ожидании ответа на сканирование CS.

Важно подчеркнуть ключевую роль, которую выполнял CS в OPERA [71]: первый шаг – подтвердить, что блок ЕСС содержит взаимодействие нейтрино; второй – распознать связанные с событиями треки, которые могли использоваться для анализа обратного сканирования ЕСС. Благодаря использованию комптоновских электронов, полученных из-за радиоактивности окружающей среды, систематические погрешности в относительном выравнивании двух дублетных пленок CS уменьшались, что позволило довести точность позиционирования до уровня 1 мкм [72].

При обнаружении одного или нескольких треков, связанных с событием, выбранный кирпич обучали космическими лучами в течение примерно 12 часов, чтобы получить набор треков для точной коррекции локальных деформаций, необходимой для точных топологических и кинематических измерений. Затем кирпич разбирали и проявляли его эмульсионные пленки. Следы, измеренные в ходе CS-анализа, позволяли получить прогноз для так называемой процедуры обратного сканирования, которая начинается с самого нижнего слоя кирпича.

Исчезновение обратного трека при сканировании указывало на возможную вершину взаимодействия нейтрино. В поисках параллельных треков и/или вторичных распадов в широкой области объемом около 1 см^3 вокруг точки остановки трека осуществлялось сканирование с помощью специальной процедуры поиска распада [73]. Эта процедура, разработанная для поиска тау-нейтрино, успешно применялась для поиска образования очарованных адронов, вызванного нейтрино. Последний процесс использовался в качестве контроля проверки эффективности обнаружения τ -лептонов, учитывая аналогичное время жизни очарованных адронов (около 10–12 с). Применение этой процедуры к мюонно-нейтринным взаимодействиям привело к наблюдению 50 кандидатов на распад [73], что хорошо согласуется с ожидаемым выходом очарованных адронов (54 ± 4), полученным из

значения, измеренного в эксперименте CHORUS [74]. Хорошее соответствие было обнаружено также в форме распределений соответствующих кинематических и топологических переменных, таких как угол в поперечной плоскости между очарованным адроном и мюоном и прицельный параметр дочерних частиц распада относительно вершины первичного нейтринного взаимодействия [73].

В течение пяти сеансов облучения детектора в пучке CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso) с 2008 по 2012 год мишень OPERA была облучена потоком протонов $\sim 1,8 \times 10^{20}$, что позволило получить более 19000 подтверждённых взаимодействий нейтрино. О первом кандидате на тау-нейтрино было сообщено в 2010 году [74], реконструкция этого события показана на рисунке 1.8. Первичная вершина нейтринного взаимодействия состоит из 7 треков, один из которых демонстрирует изломанную топологию распада. Ни одна из первичных частиц не соответствует ни мюону, ни электрону. На рисунке 1.8 видны два электромагнитных ливня, вызванных γ -квантами, обозначенными как γ_1 и γ_2 . Эти два γ -кванта исходят из вторичной вершины, и их инвариантная масса соответствует массе ρ . Из выполненного кинематического анализа следует, что зарегистрированный распад соответствует каналу $\tau \rightarrow \rho \nu_\tau$ (B.R. $\approx 25\%$), за которым следует распад $\rho \rightarrow \pi^0 \pi$.

О втором [75] и третьем [76] кандидатах на тау-нейтрино сообщалось в 2013 году, соответственно, в каналах распада $\tau \rightarrow \pi \pi \pi \nu_\tau$ и $\tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$. О четвертом кандидате было сообщено в 2014 году [76], и, наконец, статистически надежное доказательство появления ν_τ было получено в 2015 году при наблюдении пятого кандидата на тау-нейтрино на ожидаемом фоне из 0,25 событий [77]. Открытие OPERA осцилляций тау-нейтрино в пучке мюонных нейтрино было включено в научное обоснование Нобелевской премии по физике за 2015 год.

Обработка эмульсии была завершена в 2015 году, а сканирование эмульсионных пленок – в 2016 году, когда детектор уже был выведен из эксплуатации. С помощью новой стратегии анализа в окончательном анализе данных были обнаружены десять потенциальных взаимодействий тау-нейтрино. Открытие появления тау-нейтрино в пучке мюонных нейтрино было подтверждено со значимостью $6,1\sigma$. Увеличенная статистическая выборка была использована также для проведения первого измерения Δm^2_{32} в режиме визуализации с повышенной точностью, что дало значение $\Delta m^2_{32} = (2,7 - 0,6 + 0,7) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ [78].

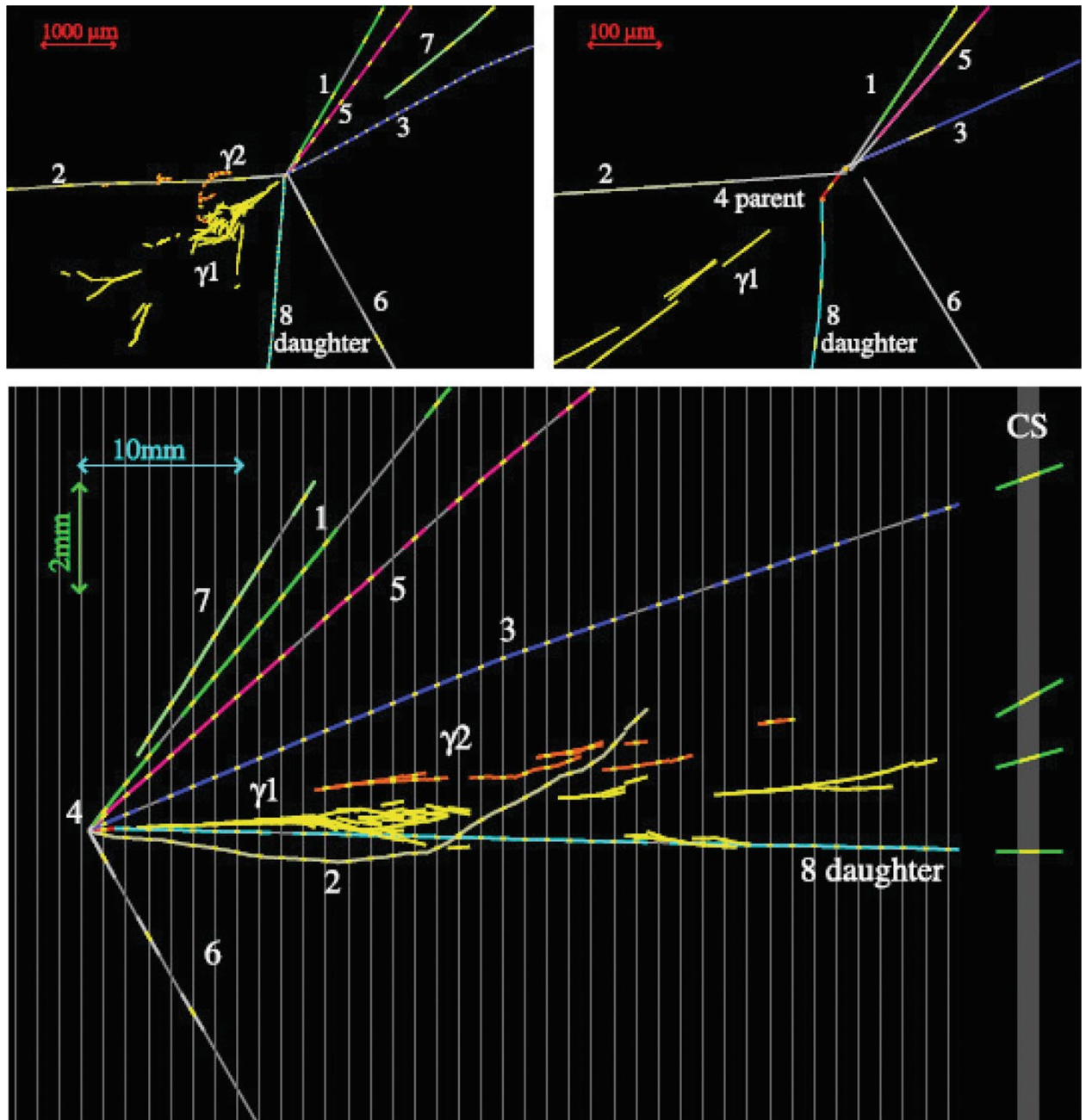


Рисунок 1.8 – Изображение первого кандидата на ν_τ . Вверху слева: вид поперек направления движения нейтрино. Вверху справа: тот же вид, увеличенный на главной и вторичной вершинах. Внизу: продольный вид трека 4 демонстрирует изломанную топологию с углом (41 ± 2) мрад при длине пути (1335 ± 35) мкм и формирует трек 8 и два γ . Трек 2 идентифицирован как протон, а все остальные заряженные частицы предположительно являются адронами [74].

Таким образом, эксперимент OPERA продемонстрировал способность идентифицировать все три вида нейтрино и показал, что эмульсионные камеры, благодаря их микрометрической точности, подчеркивающей смещение между вершинами образования и взаимодействия γ -квантов, позволяют четко различать электроны и γ -кванты.

В отличие от других детекторов, эта особенность делает разделение e/π^0 особенно эффективным, а их отбор – чистым, что приводит к очень хорошему разделению взаимодействий ν_e по каналу заряженного тока и ν_μ по каналу нейтрального тока при π^0 в конечном состоянии. При анализе данных за 2008 и 2009 годы было обнаружено 19 кандидатов на взаимодействия электронного нейтрино, результаты обобщены в [79]. В результате окончательного анализа было получено 35 ν_e - кандидатов, и ограничения на стерильные нейтрино [80; 81].

1.4 Автоматизированные системы сканирования и крупномасштабное производство эмульсий

Одновременно с развитием методики эмульсионных трековых детекторов развивались методы автоматизации измерений. Ни одна из производимых промышленностью систем для автоматического анализа изображений не была сконструирована специально для обработки данных, получаемых с помощью детекторов с протравленными треками. Это заставляло исследователей либо создавать свои системы обработки, либо самостоятельно дорабатывать и адаптировать коммерческие системы для своих целей [82-84]. При этом необходимо было решить две основные задачи: первая – выделение объектов с уровнем потемнения больше заданного, и вторая – распознавание особенностей формы объектов. С появлением мощных компьютеров стало возможным создание первых автоматических анализаторов изображений. Все современные эмульсионные эксперименты сканируют облученные слои на высокотехнологичных автоматизированных микроскопах.

История их создания начинается с крупного прорыва в эмульсионной технике, произошедшего в 1974 году, когда Нагойская группа представила идею томографического считывания с эмульсионных пластин [85]. При толщине эмульсионного слоя примерно в 20 раз превышающего глубину фокальной плоскости можно получить несколько томографических изображений путем отбора изображений с шагом по глубине слоя эмульсии. Полученные изображения можно наложить в соответствии с заданным значением предполагаемого наклона трека, осуществляя поиск пространственного совпадения зерен. После применения порогов обнаружения, необходимых для удаления случайного фона, можно определить трек. Реализация этой концепции привела к разработке системы первого поколения [47], в которой 16 томографических изображений накладывались друг на друга, а для захвата изображения использовалась телевизионная

трубка. Эта концепция была разработана и успешно применена к сканированию CS-эмульсий в эксперименте E653 в Fermilab [51].

Этот метод был развит Нагойской группой в виде так называемого селектора треков [57]. Телевизионное видео было заменено ПЗС-камерой, что привело к более высокой стабильности и лучшему пространственному разрешению. Процессор обработки изображений на базе FPGA обрабатывал 16 томографических изображений каждой эмульсионной пластины. Скорость сканирования фактически была ограничена временем, необходимым для перемещения объектива с компьютерным управлением в 16 различных фокусных положений, поскольку для каждого шага требовалось некоторое время для гашения вибраций. Другим ограничивающим фактором был размер поля зрения оптики. Была достигнута эффективность отслеживания, достигающая 90%, при этом основным источником фоновых следов были короткие комптоновские треки электронов. В Лаборатории INFN в Салерно была разработана система сканирования, основанная на другом подходе [86]. В этом устройстве использовался многотрековый подход без предварительного выбора угла.

Следующим важным шагом в системе сканирования стало внедрение полностью автоматических методов автономного анализа, помимо оцифровки отдельных треков под заданным углом, выполняемой с помощью селектора треков. Этот прогресс был обусловлен наличием более быстрой электроники и ПЗС-матриц, а также более производительной механики микроскопа. Так называемый метод сетевого сканирования [87], разработанный в университете Нагойи (Япония), позволял реконструировать треки путем сопоставления всех обнаруженных сегментов трека независимо от их угла наклона. Очевидно, что область, на которой реально могло быть выполнено сетевое сканирование, зависела от доступной скорости сканирования, которая составляла около 1 см^2 в час в системе UTS (Ultra Track Selector) [57] и использовала параллельную обработку данных. Метод сетевого сканирования позволял полностью реконструировать события как в вершинах взаимодействия, так и в точках распада, проводить точные измерения [88], искать последующие распады частиц, определять импульс методом многократного кулоновского рассеяния [89] и идентифицировать электроны методом анализа каскадных ливней [90]. На рисунке 1.9 показаны различные этапы обработки данных об эмульсии в методе сетевого сканирования.

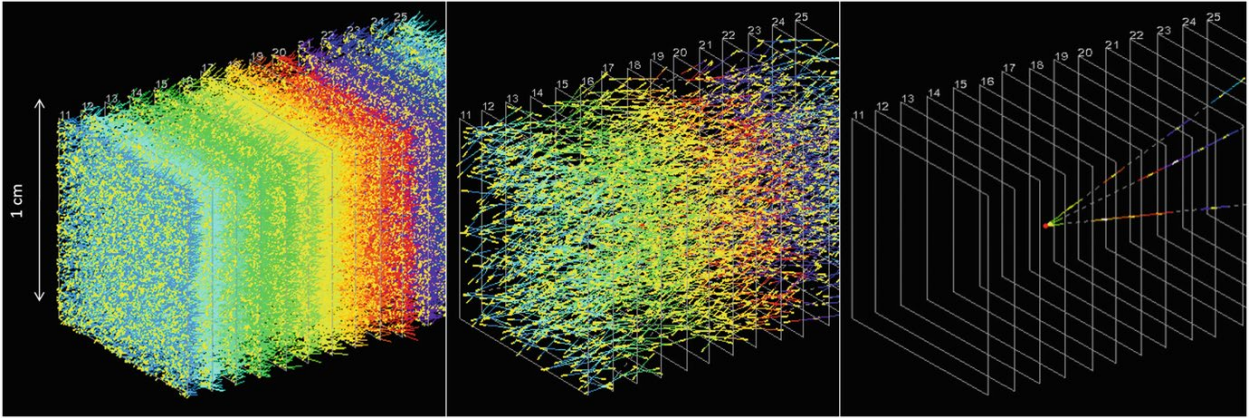


Рисунок 1.9 – Различные этапы обработки данных в эмульсии при использовании метода сетевого сканирования. На левом графике реконструированы все базовые треки в 15 пленках исследуемого объема; они участвуют в процессе прослеживания, из которого реконструируются треки, как показано на среднем графике; на правом графике отбрасываются сквозные треки и реконструируется вершина взаимодействия

Достижения в области сканирующих систем, направленные на повышение эффективности и скорости, привели к активизации работ с эмульсионными детекторами. В Нагойе было разработано новое поколение селекторов треков, получившее название S-UTS (Super-Ultra Track Selector) [91]. Главной особенностью этого подхода является отказ от процесса Stop&Go на этапе получения данных изображения, который является механическим узким местом традиционных систем. Чтобы избежать остановки, линза объектива движется с той же постоянной скоростью, что и рабочий стол, одновременно перемещаясь вдоль вертикальной оси и снимая изображения с помощью очень быстрой ПЗС-камеры, работающей на частоте 3000 Гц. Оптическая система управляется пьезоэлектрическим устройством. Камера оснащена сенсором с разрешением 512×512 пикселей, который обеспечивает меньшее поле зрения ($\approx 120 \times 120$ мкм²) для обеспечения сопоставимого разрешения по местоположению (около 0,3 мкм/пиксель). Высокоскоростная камера обеспечивает скорость передачи данных 1,3 Гбит/с. Ведется обработка интерфейсным процессором анализа изображений. Специальная плата обработки выполняет распознавание треков, реконструирует микротреки и сохраняет их на временном устройстве со скоростью 2-10 МБ/с. Компьютерный алгоритм связывает микротреки слоев эмульсионной пленки и записывает полученные треки в базу данных, которая используется в качестве входных данных для физического анализа. Система S-UTS достигла скорости 72 см²/ч/слой (по сравнению с обычной скоростью сканирования 20 см²/ч/слой) за счет использования большего поля зрения без ухудшения микрометрической точности, присущей эмульсионным пленкам. В настоящее время

скорость сканирования на автоматизированных микроскопах в Нагойе достигла $4500 \text{ см}^2/\text{час}$.

Совместные усилия нескольких европейских лабораторий позволили разработать для эксперимента OPERA автоматизированную систему сканирования ESS на основе системы, разработанной в Салерно [86] и подробно описанной в работах [92, 90]. Микроскоп представляет собой декартовый робот, удерживающий эмульсионную пленку на горизонтальной подставке, перемещаемой в плоскости XY, с CMOS-камерой, установленной на оптической оси Z, вдоль которой ее можно перемещать для изменения фокальной плоскости с шагом, примерно равным глубине фокусировки около 3 мкм . На рабочей станции управления установлен блок управления движением, который направляет пульт управления таким образом, чтобы он охватывал сканируемую область, и перемещает камеру вдоль оси Z для получения последовательностей оптических томографических изображений (при этом пульт управления в плоскости XY остается неподвижным). Области, размеры которых превышают одно поле зрения, составляющее примерно $300 \times 400 \text{ мкм}^2$, сканируются путем повторения последовательности сбора данных в сетке смежных полей зрения. Панель перемещается в нужное положение, и после ее остановки выполняется съемка изображений с помощью алгоритма Stop&Go. Изображения снимаются мегапиксельной камерой со скоростью 376 кадров в секунду, когда камера движется вдоль оси Z. Вся система может работать с постоянной скоростью $20 \text{ см}^2/\text{час}$ на слой 24 часа в сутки при средней скорости передачи данных до $4 \text{ ГБ}/\text{день}$ на микроскоп, сохраняя при этом присущую эмульсии точность. В конфигурации этой системы в университете Берна иммерсионное масло не используется в качестве интерфейса между линзой объектива и сканируемой пленкой [81].

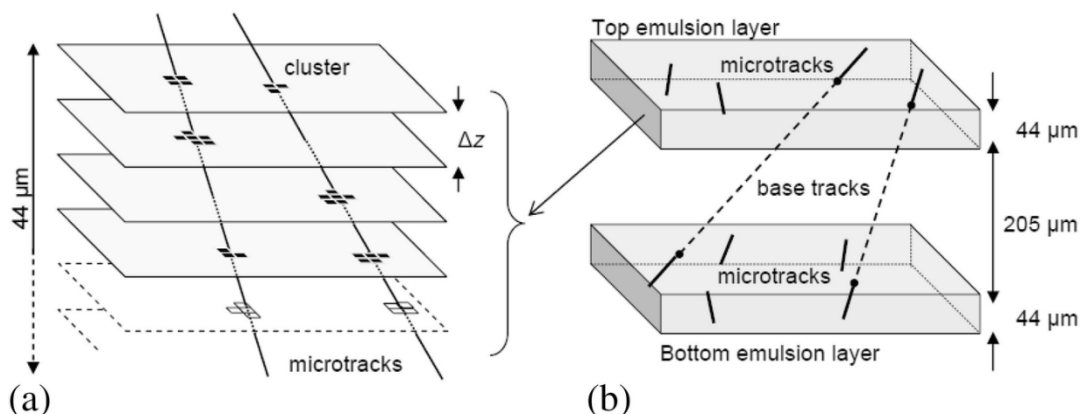


Рисунок 1.10 – (а) реконструкция микротреков в одном эмульсионном слое путем объединения кластеров, принадлежащих изображениям на разных уровнях; (б) соединение микротреков на пластиковой основе для формирования базовых треков.

На рисунке 1.11 показаны система S-UTS и сканирующая станция университета Берна (Швейцария), использующие систему ESS с сухими объективами и автоматической сменой эмульсионной пленки. Последнее устройство позволяет работать полностью в автоматическом режиме [93].

Вторым фактором, существенно повлиявшим на развитие методики эмульсионных детекторов, стало создание линий промышленного производства ядерных эмульсий высокого качества для научных исследований. Это, в частности, относится к продукции фирмы FUJI в сотрудничестве с университетом Нагойи [5] для эксперимента OPERA. Для изготовления эмульсионных детекторов общей массой около 100 тонн для эксперимента OPERA была разработана технология равномерного автоматического полива эмульсионных слоев толщиной 44 мкм на обе стороны пластиковой основы, позволившая достичь высокого качества эмульсионных пленок.



Рисунок 1.11 – Слева: Одна из сканирующих систем Nagoya S-UTS; справа: сканирующая станция в Берне, оснащенная пятью микроскопами ESS с автоматическими устройствами смены пленки

Для нанесения эмульсионных слоев на основу машинным способом на промышленном предприятии требуется разбавление геля для снижения вязкости, что означает уменьшение плотности зерен в эмульсионном геле. Чтобы компенсировать этот недостаток, был разработан контролируемый двухструйный метод получения монодисперсных микрокристаллов AgBr, который позволяет контролировать размеры кристаллов. При его использовании количество кристаллов вдоль траектории движения частиц увеличивается, в то время как объем AgBr и средний диаметр кристаллов остаются постоянными.

Чтобы согласовать требования к толщине наносимого эмульсионного слоя с ограничениями, обусловленными технологией промышленного процесса, компания FUJI

применила метод многослойного покрытия. После нанесения первого слоя (толщиной 20 мкм) на обе стороны рулонной пластиковой основы, поверх первого слоя наносится второй слой. Слои эмульсии защищены тонкой желатиновой прокладкой толщиной 2 мкм. В результате полученная толщина составляет 44 мкм, что вполне достаточно для распознавания следов на автоматизированном микроскопе. Для восстановления толщины проявленных эмульсионных слоев до первоначального значения используется глицериновая ванна, которая компенсирует усадку, вызванную процессом нанесения.

Другим заметным достижением, связанным с экспериментом OPERA, стала реализация так называемого обновления («рефрешинга») эмульсии. Высокая температура и влажность усугубляют деградацию изображения, особенно если облучение эмульсии происходит спустя продолжительное время после производства пленки. Эффективная компенсация этого процесса была достигнута путем введения 5-метилбензотриазола в эмульсионный гель [2]. Поглощение этого химического вещества частицами серебра, вызванное облучением, снижает окислительно-восстановительный потенциал и облегчает окисление частиц. С другой стороны, центры чувствительности (атомы серы и золота) остаются устойчивыми к окислению. Таким образом, фоновые треки стираются, в то время как чувствительность остается достаточно высокой. Например, при хранении пленок в течение 3 дней при относительной влажности 98% и температуре 27°C плотность зернистости следов, накопленных до рефрешинга, снижается с 30 до менее чем 10 зерен на 100 мкм, что приводит к стиранию около 96% сохраненных фоновых следов, в том числе от комптоновских электронов и космических лучей.

Глава 2. Имплементация новых технологий сканирования трековых детекторов

2.1 Модернизация сканирующего комплекса ПАВИКОМ-1

Для анализа экспериментальных данных, полученных с применением эмульсионных камер, используется метод сетевого сканирования, основанный на параллельной обработке информации посредством высокоскоростной электроники и быстрых CCD и CMOS видеокамер, обеспечивающих регистрацию и цифровизацию оптических изображений [88; 94; 95]. В автоматизированном режиме оцифрованные изображения траекторий заряженных частиц, зафиксированные видеокамерами, передаются в вычислительную систему, программное обеспечение которой осуществляет поиск, идентификацию и анализ треков, восстановление их пространственного положения, реконструкцию вершин взаимодействий и распада, а также другие операции. Данный подход предоставляет возможность определения импульса частицы методом многократного кулоновского рассеяния и идентификации электронов через формирование электронных каскадов.

Современные измерительные системы позволяют осуществлять сканирование двухсторонних эмульсионных пленок с толщиной чувствительного слоя 50 мкм со скоростью до 190 см²/ч, что, принимая во внимание микрометрические размеры треков, делает возможным обработку значительных объемов данных в реальном времени. Это играет ключевую роль в масштабных экспериментах с большими объемами эмульсионных данных, особенно в случаях, когда эмульсионные модули облучают на ускорителях.

Модернизация установки ПАВИКОМ-1 была проведена для обеспечения совместимости с требованиями эксперимента SND@LHC и эффективной обработки получаемых данных. Эксперимент SND@LHC [96] направлен на изучение высокоэнергетичных нейтрино с псевдобыстроходами в диапазоне $7,2 < \eta < 8,4$. Детектор представляет собой гибридную систему, состоящую из мишени массой 830 кг (рисунок 1, а), изготовленной из чередующихся слоев вольфрамовых пластин, эмульсионных и электронных трекалов, которая одновременно выполняет функцию электромагнитного калориметра (рисунок 1, 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.

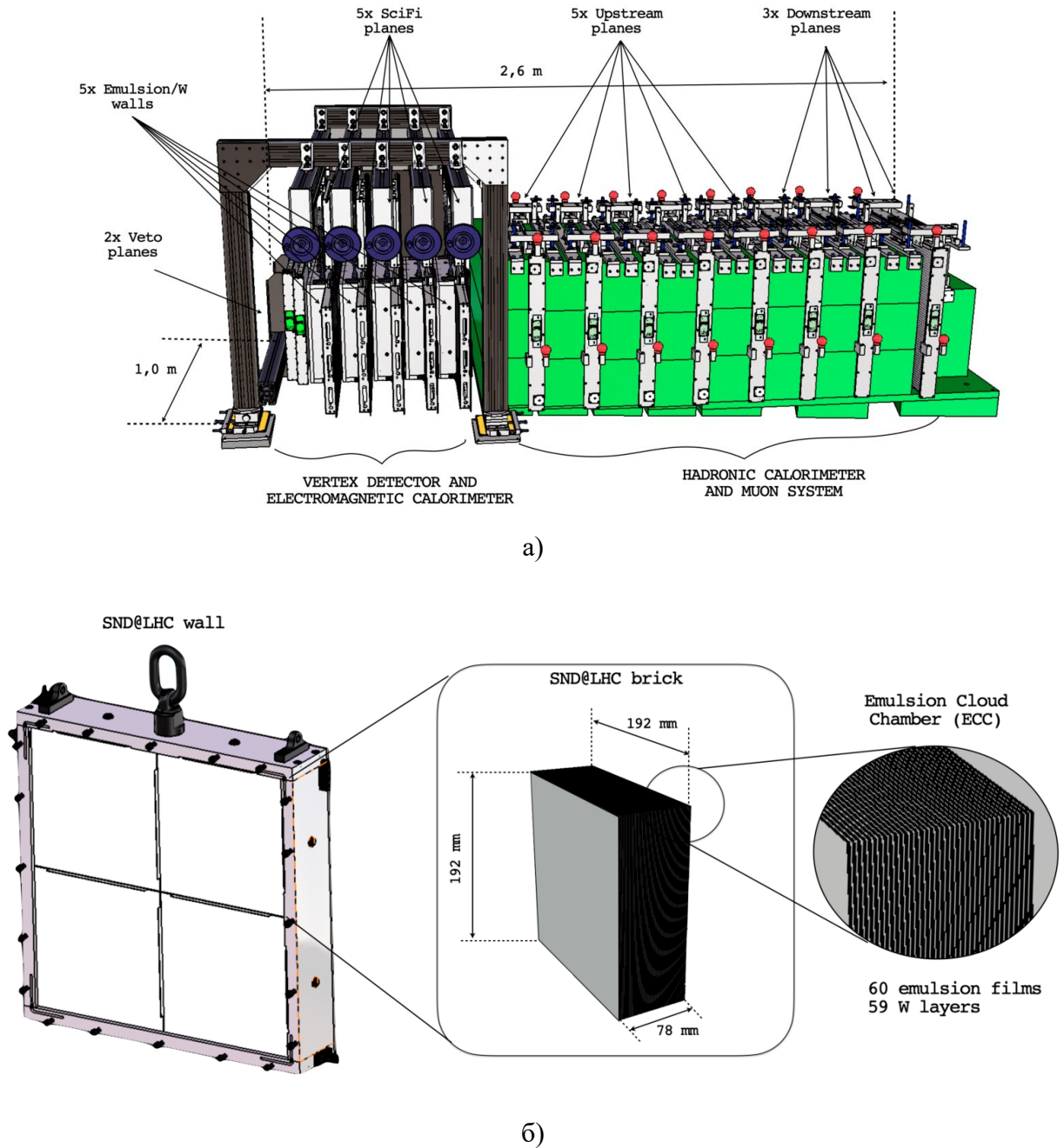


Рисунок 2.1 Схема эксперимента SND@LHC, а – общая схема, б – эмульсионная стена, состоящая из четырех блоков, каждый из которых состоит из 60 эмульсионных пленок, чередующихся с 59 вольфрамовыми листами.

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 [94].

Основной особенностью и уникальным достоинством комплекса ПАВИКОМ является его универсальность: он позволяет обрабатывать данные всех используемых в современной физике трековых детекторов, содержащих визуальную информацию о характеристиках частиц и их взаимодействиях, к которым относятся ядерные эмульсии, пластиковые детекторы, фосфатные стекла, кристаллы оливинов из метеоритов и др. Комплекс состоит из трёх независимых установок (ПАВИКОМ-1, ПАВИКОМ-2, и ПАВИКОМ-3), индивидуальные технические возможности которых отличаются диапазоном перемещения оптической системы в плоскости детектора и, соответственно, допустимыми размерами материалов для обработки [94]. На установках ПАВИКОМ в режиме полной автоматизации осуществляется поиск и оцифровка координат треков заряженных частиц в материале детектора, распознавание и прослеживание треков, систематизация и первичная обработка данных.

Основными компонентами сканирующих установок ПАВИКОМ являются оптические системы, оснащенные высокоскоростными видеокамерами, платы оцифровки видеоизображения, автоматические прецизионные столы, графические станции и мощные современные компьютеры. Объектив микроскопа формирует на чувствительной матрице видеокамеры изображение трека последовательно по всей глубине детектора. Сформированный сигнал передается на вход карты оцифровки и захвата изображения; карта пересылает эти данные в память компьютера и выводит оцифрованный видеосигнал в реальном времени на монитор.

На самой крупной установке ПАВИКОМ-1 используется самый большой (из трех микроскопов) прецизионный стол фирмы MICOS, включающий массивную платформу и подвижный предметный стол размером 500×800 мм (рисунок 2.2). Точность перемещения предметного стола составляет 0,5 мкм. Виброустойчивость стола обеспечивается его массой ~ 1 т. Для уменьшения теплового расширения кронштейн для крепления объектива микроскопа выполнен из гранита. Управление предметным столом осуществляется как с компьютера, так и в ручном режиме с помощью джойстика.

Над столом закреплен оптический блок, оснащенный видеокамерой, с возможностью перемещения в вертикальной плоскости. Видеокамера Mikrotron EoSens 4CXP C-mount представляет собой устройство на основе монохромной CMOS-цифровой матрицы с разрешением 2336×1728 пикселей и максимальной частотой 563 кадра в секунду. В оптической системе установлен объектив Nikon CFI Plan Fluor 20X MI, имеющий

числовую апертуру 0,75 и дающий 20-кратное увеличение. Аналоговый сигнал с видеокамеры передается по специальному дата-кабелю CXP 5W5 на вход платы захвата изображений SiliconSoftware microEnable-5, технические характеристики которой совместимы с параметрами камеры и графической станции. Данная комплектация разработана при сотрудничестве ФИАН с Национальным институтом ядерной физики Италии (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN).



Рисунок 2.2 – Установка ПАВИКОМ-1

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.

Программное обеспечение ПАВИКОМ включает систему сканирования LASSO [95], которая является результатом исследований и разработок, направленных на увеличение скорости сканирования, расширение углового допуска при распознавании трека и высокую эффективность при реконструкции трека. Система была разработана для использования на аппаратном обеспечении European Scanning System (ESS) [96] и обладает необходимой гибкостью для адаптации к оборудованию нового поколения.

Каждый модуль реализует определенную функцию и предоставляет удобные интерфейсы для ее использования. Модули управления камерой и предметным столом обеспечивают соответственно функции захвата изображений и управления положением объектива. Модуль GUI представляет собой удобный графический интерфейс, позволяющий вручную изменять параметры системы сканирования и управлять процессом сканирования. Управляющий модуль координирует работу как предметного стола, так и камеры на этапе сканирования, вычисляет координаты изображения и отправляет их в модуль обработки изображений. Модуль обработки изображений выполняет реконструкцию кластеров (наборов смежных пикселей), отправляя их в модуль отслеживания для реконструкции зерен (вертикальных цепочек кластеров) и микротреков (последовательностей зерен). Управляющий модуль предоставляет интерфейс обратной связи, позволяющий управлять процессом сканирования путем изменения параметров сканирования без необходимости прерывания процесса сканирования, и внешний интерфейс управления, который может использоваться другими приложениями для управления сканированием.

Система LASSO может работать в двух режимах сканирования, стандартном режиме Stop&Go (SG) и новом для всех европейских лабораторий режиме непрерывного движения Continuous Motion (CM) [97]. В режиме SG сбор данных выполняется во время перемещения объектива вдоль вертикальной оси, в то время как горизонтальные оси остаются неподвижными. Таким образом, скорость сканирования ограничивается $84 \text{ см}^2/\text{ч}$ на время, необходимое для горизонтального перемещения предметного стола в следующее поле зрения. Режим сканирования CM позволяет увеличить скорость сканирования до $190 \text{ см}^2/\text{ч}$ без каких-либо изменений в конфигурации оборудования, как описано в [97].

Коммуникационное взаимодействие между контроллером и управляющим вычислительным устройством реализуется через интерфейс COM-порта. Для обеспечения интеграции контроллера с координатным столом в системе LASSO 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.

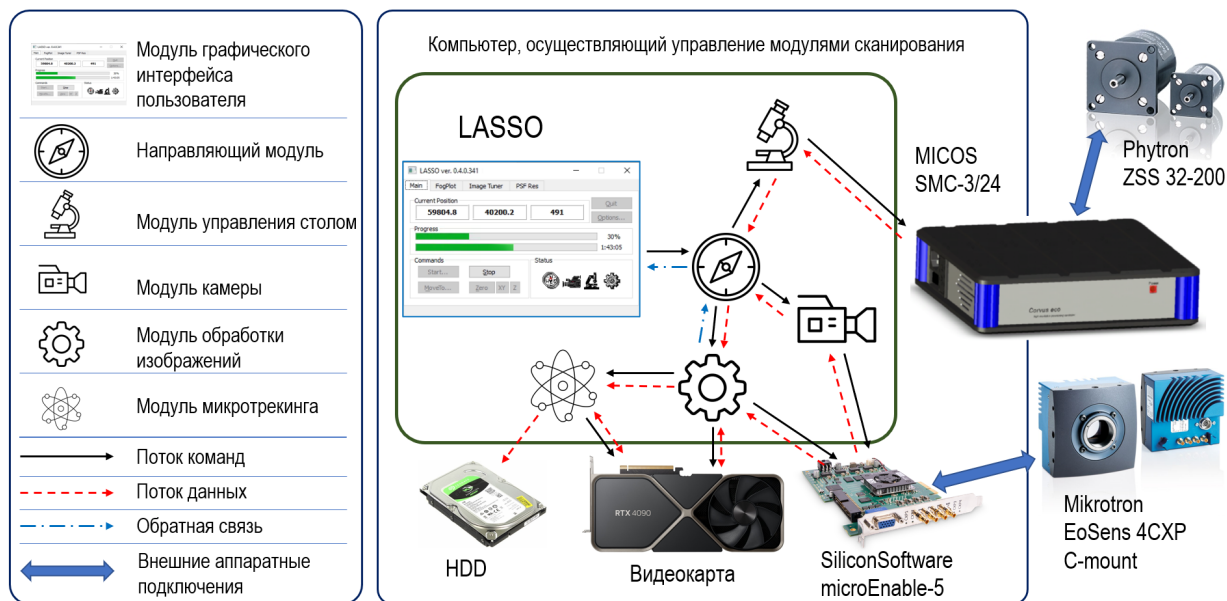


Рисунок 2.3 – Схема структуры LASSO в комплексе ПАВИКОМ-1

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, аналогичная системам, применяемым на двух других установках комплекса. Необходимость получения равномерно освещенного поля зрения и освещение его максимально широким пучком света достигается в современной микроскопии именно путем организации освещения по Келеру;
- интегрирована 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 запись в историю движений	Обнуление координат
Stop	–	Текущая позиция с последующей запись в историю движений	Остановка движения на всех осях
QueryPos	Порядковый номер оси	Текущая позиция с последующей запись в историю движений	Функция чтения координат с последующей записью в историю движения
MoveTo	Класс с координатами	Текущая позиция с последующей запись в историю движений	Функция, осуществляющая движение в заданные координаты
MoveStage	Класс с параметрами: координаты, скорость, ускорение, замедление.	Текущая позиция с последующей запись 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,	Текущая позиция с последующей запись в историю движений	Функция, отвечающая за движение Stop&Go. В первую итерацию функция ожидает окончания движения, далее

	ускорение, замедление		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

Затем были отсканированы эмульсии эксперимента SND@LHC, облученные во время одного из первых тестовых сеансов, RUN 1, интегральная светимость которого составила $0,5 \text{ фб}^{-1}$ [98] при полной загрузке нейтринного детектора, получены результаты по микротрекам (МТ). 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 для их окончательной обработки в ЦЕРН.

Эмульсионная пластина нейтринного детектора SND@LHC эксперимента имеет размеры $192 \times 192 \text{ мм}^2$ и толщину чувствительного слоя 70 мкм . На рисунке 2.4 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 3 имеют 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 эмульсионного слоя, как для верхнего, так и нижнего, 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 2.5 даны распределения

по числу проявленных зерен в верхнем и нижнем эмульсионном слое, а также суммарное распределение по двум слоям.

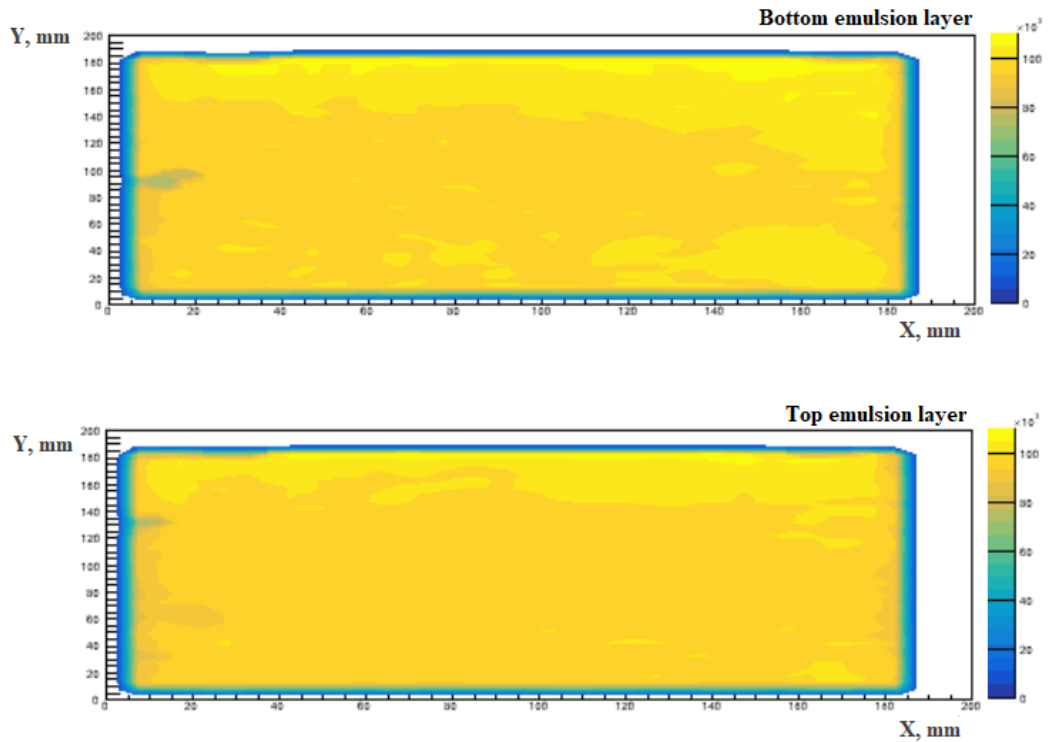


Рисунок 2.4 – Распределение микротрасс для верхнего и нижнего слоев ядерной эмульсии

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.

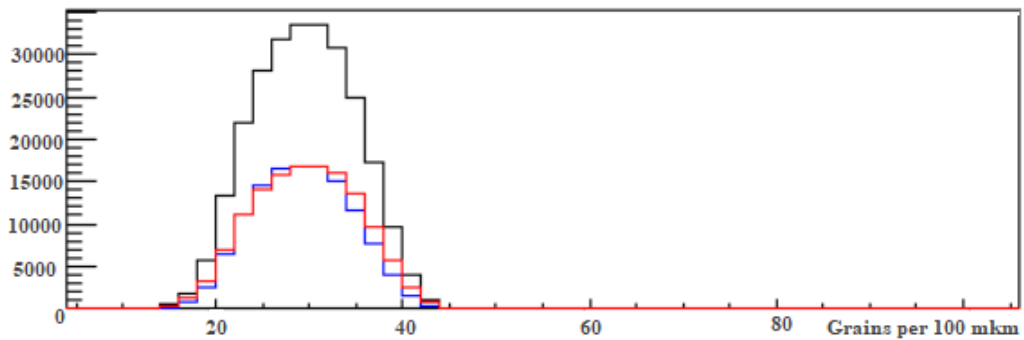


Рисунок 2.5 – Чувствительность эмульсионного слоя: синяя линия – нижний эмульсионный слой, красная линия – верхний эмульсионный слой, черная – их суммарное распределение

Экспериментальные результаты, полученные с помощью сканирующей станции ПАВИКОМ-1, представленные на рисунках 2.4 и 2.5, 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.

2.2 Модернизация сканирующего комплекса MIC-1

Аналогично модернизации сканирующего комплекса ПАВИКОМ-1 проводились работы с комплексом MIC-1, находящимся в Неапольской Лаборатории Национального института ядерной физики Италии (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN). Были внедрены новейшие линейные двигатели V-412 компании PI (рисунок 2.6).

Линейные двигатели являются прямыми электромагнитными приводами. Они не содержат механических компонентов в трансмиссии и передают приводное усилие непосредственно и без трения на движущуюся платформу. Приводы обеспечивают высокие скорости и ускорения, показанные в таблице 2.



Рисунок 2.6 – Линейный двигатель V-412.

Таблица 2 – Технические характеристики двигателя V-412

Движение	Единица измерения	Параметр
Активные оси		X
Диапазон перемещения в X	мм	305
Максимальная скорость в X без нагрузки	мм/с	2000
Прямолинейность (линейные перекрестные помехи в Y при движении по X)	мкм	±6
Плоскостность (линейные перекрестные помехи в Z при движении по X)	мкм	±6
Угол наклона (Вращательные перекрестные помехи в θY при движении по X)	мрад	±29
Рыскание (перекрестные помехи при вращении в θZ и движении в X)	мрад	±29

Определение координат	Единица измерения	Параметр
Минимальное перемещение с шагом в X	мкм	0,01
Точность позиционирования в X без калибровки	мкм	±10
Двунаправленная повторяемость в X	мкм	1
Концевые выключатели		
Встроенный датчик		Абсолютный линейный кодер
Сигнал датчика		EnDat 2.2
Период сигнала датчика	Мкм	0,001
Разрешение датчика	нм	1
Разрешение датчика, разрядность	бит	32
Свойства привода	Единица измерения	Параметр
Тип привода		Бесщеточный 3-фазный линейный двигатель
Номинальное напряжение	Вольт	300
Номинальный ток, RMS	Ампер	2,3
Пиковый ток, RMS	Ампер	7,55
Приводное усилие в X	Ньютон	33
Пиковое усилие в X	Ньютон	151
Усилие постоянное	Ньютон/Ампер	19,9
Двигатель постоянный		4
Время постоянное	мс	0,19
Сопротивление фаза-фаза	Ом	8,96
Индуктивность фаза-фаза	Генри	1,4
Обратная ЭДС фаза-фаза	миллиньютон	8,1
Шаг полюсов N-N	мм	30,5
Механические свойства		
Допустимое усилие нажатия в Y	Ньютон	200
Допустимое усилие нажатия в Z	Ньютон	400
Допустимый крутящий момент в θX		20
Допустимый крутящий момент в θY		15
Допустимый крутящий момент в θZ		20
Перемещаемая масса в X без нагрузки	грамм	1700
Руководство		Направляющая шарикоподшипника с рециркуляцией
Общая масса	грамм	7900
Материал		Алюминий, черная анодированная нержавеющая сталь
Прочие	Единица измерения	Параметр
Диапазон рабочих температур	°C	от 5 до 40

Для управления двигателями используется контроллер G-900K044 (рисунок 2.7). В соответствии со своей конструкцией G-900K044 предназначен для управления осями PI, оснащенными шаговым двигателем, двигателем постоянного тока или 3-фазным линейным двигателем. G-900K044 предназначен как для работы с разомкнутым контуром, так и для работы с замкнутым контуром осей с инкрементальным датчиком положения. Кроме того, G-900K044 может считывать и обрабатывать сигналы контрольной точки и концевого выключателя с подключенных осей.

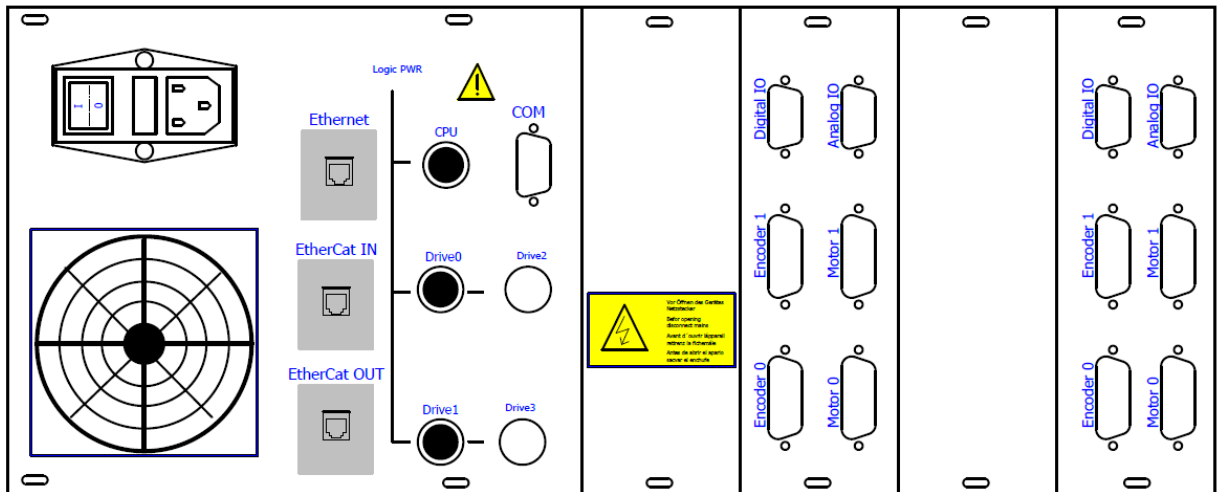


Рисунок 2.7 – Схема выводов контроллера G-900K044

На следующей схеме показаны основные компоненты аппаратного обеспечения контроллера:

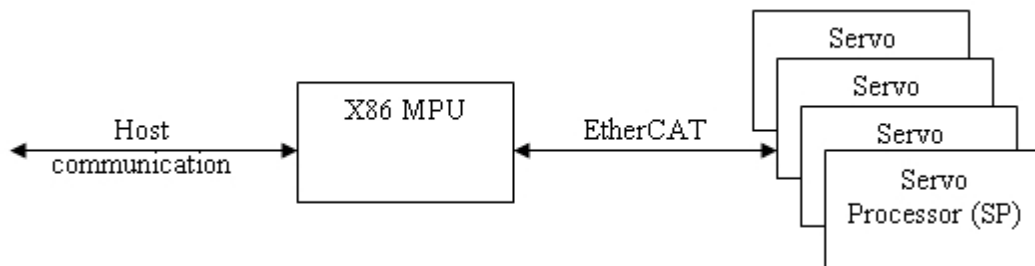


Рисунок 2.8 – Аппаратная структура контроллера SPiiPlus

Модуль обработки движения (MPU), который выполняет большинство задач контроллера, представляет собой мощный процессор x86. MPU является ведущим устройством шины EtherCAT, а сервопроцессоры (SP) – подчиненными устройствами EtherCAT. Один ведущий процессор может управлять несколькими подчиненными устройствами.

- Главный модуль MPU запускает скомпилированные программы ACSPL+ и генерирует профили движения для SPs. Его основными задачами являются:
- Взаимодействие с SPs.

- Формирование профиля движения (расчет APOS).
- Расчет исходного положения (RPOS).
- Контроль безопасности.
- Сбор данных.
- Генерация события позиционирования (PEG).
- Обработка введенных индексов и меток.
- Выполнение программ ACSPL+.
- Подключение к последовательному каналу связи или Ethernet.
- Немедленное выполнение команд, полученных от хоста.

MPU оснащен энергонезависимой флэш-памятью, в которой сохраняются сохраненные данные после отключения питания контроллера.

SP выполняет задачи в реальном времени, такие как реализация алгоритмов управления в реальном времени. Каждый SP управляет четырьмя осями. SP включает в себя все необходимые периферийные устройства, которые необходимы для высокопроизводительного управления осями.

Один модуль MPU может управлять несколькими устройствами по шине EtherCAT, тем самым увеличивая количество управляемых осей (рисунок 2.9).

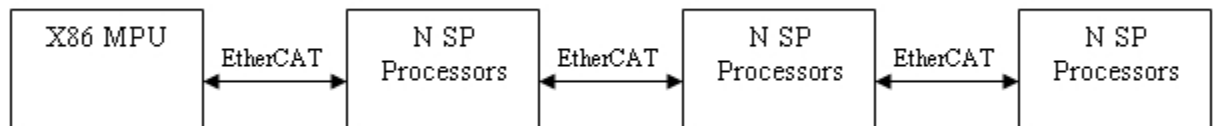


Рисунок 9 – Несколько SPS, подключенных через EtherCAT

Прошивка состоит из набора файлов, записанных во флэш-память на заводе-изготовителе. Ее нельзя стереть или изменить, однако можно обновить версию с помощью специального инструмента, входящего в состав SPiiPlus MMI, который поставляется вместе с контроллером.

Файлы встроенного ПО содержат следующее:

- Программа MPU.
- Значения переменных конфигурации контроллера по умолчанию.

Встроенное ПО работает в жестких рамках реального времени. Две основные части встроенного ПО, программа MPU и SP-программы, являются программами реального времени, работающими строго синхронно. Прерывание SP имеет фиксированный интервал времени (называемый “тактом сервопривода”), равный 50 мкс (20 кГц). Большинство задач SP выполняются каждый такт сервопривода. Таким образом, SP выполняет алгоритм сервоуправления с постоянной частотой 20 кГц, независимо от количества осей и других

факторов. Тактовая частота SP 20 кГц делится на коэффициент 20, генерируя тактовую частоту 1 кГц для прерываний MPU. Новый тактовый цикл контроллера составляет 1000 мксек.

Задачи программы MPU делятся на две категории:

- Задачи реального времени

Задачи реального времени выполняются строго синхронно с прерыванием MPU. В каждом цикле работы контроллера выполняется необходимая часть каждой задачи реального времени. Общее время выполнения всех задач реального времени в одном цикле контроллера должно быть меньше, чем один цикл контроллера.

Следующие задачи MPU — это задачи реального времени, которые выполняются в каждом цикле контроллера:

- Связь с SPS.
- Формирование профиля движения (расчет APOS).
- Расчет исходного положения (RPOS).
- Контроль безопасности.
- Сбор данных.
- Генерация событий определения местоположения (PEG).
- Обработка входных данных Index и Mark.
- Выполнение программ ACSPL+.
- Фоновые задачи.

Фоновые задачи не синхронизированы с прерыванием MPU. Выполнение фоновой задачи может перекрывать два или более циклов контроллера.

Следующие задачи MPU являются фоновыми и выполняются асинхронно по отношению к циклу работы контроллера:

- Подключение к последовательному каналу связи или Ethernet
- Выполнение немедленных команд, полученных от хоста

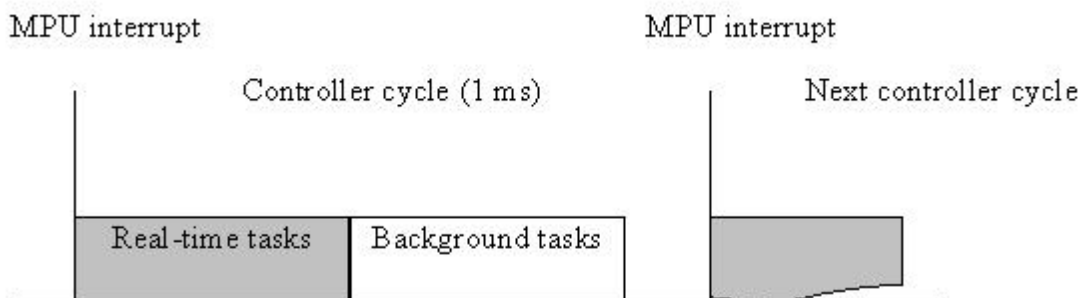


Рисунок 2.10 – Внутренняя структура цикла управления

Прерывание MPU запускает задачи реального времени. Когда все задачи реального времени, требуемые в текущем цикле, завершены, контроллер начинает выполнять фоновые задачи. Если фоновые задачи завершаются до того, как произойдет следующее прерывание MPU, контроллер остается в режиме ожидания до конца цикла.

Точное время выполнения задач реального времени и фоновых задач в каждом цикле работы контроллера зависит от многих факторов и не может быть точно определено. В следующих параграфах описываются различные ситуации использования цикла работы контроллера.

Если выполнение фоновой задачи не завершается за один цикл работы контроллера, фоновое выполнение прерывается и продолжается после выполнения задач реального времени в течение следующего цикла. Таким образом, фоновые задачи могут накладываться на следующее прерывание MPU, не вызывая проблем. Однако переполнение задач реального времени при следующем прерывании MPU является ненормальным и может вызвать проблемы с выполнением программы. Когда это происходит, контроллер фиксирует ошибку превышения времени. Контроллер не реагирует на эту неисправность по умолчанию, но разработанная программа может отслеживать неисправность и определять правильную реакцию.

Контроллер предоставляет до 64 программных буферов.

Каждый буфер обеспечивает:

- Отдельное хранилище для каждой программы ACSPL+.
- Изолированную среду для редактирования/выполнения программы.
- Отдельный поток для параллельного выполнения.
- Независимое выполнение автопрограммы.

Каждый буфер управляется независимо от других буферов. Например, возможно редактировать программу в одном буфере, пока выполняется программа в другом буфере.

Все метки и локальные переменные в программе являются локальными в инкапсулирующем буфере. Программы в других буферах не имеют доступа к этим меткам и переменным. Даже если две программы в разных буферах определяют локальную переменную с одинаковым именем, эти переменные рассматриваются как две разные переменные, каждая из которых находится в соответствующем буфере.

Программа в буфере может выполняться независимо от любой другой программы. Программа, выполняемая в буфере, не влияет на программу, выполняемую в других буферах, если только не была предусмотрена синхронизация через глобальные переменные или общие ресурсы.

Если программа в буфере включает в себя одну или несколько автопрограмм, буфер управляет автопрограммами независимо от других буферов. Если выполняется условие автопрограммы, прерывается только программа, выполняемая во включенном буфере. Другие буфера не затрагиваются.

Время, отведенное на обработку неисполняемых строк, например, комментария, новой строки, метки и т.д., определяется битом S_FLAGS.1. Если бит равен 0 (по умолчанию), неисполняемая строка будет пропущена во время выполнения. Если бит равен 1, строке будет отведен цикл управления. выполняется, как и раньше, с использованием стандартного времени выполнения.

Бит влияет на компиляцию программы, поэтому, если изменить бит, результаты будут видны только после перекомпиляции программы.

Последующая интеграция модуля управления движением столика включала в себя реализацию функций, осуществляющих движение как в ПАВИКОМ-1 (таблица 1). Тем не менее за счет новой архитектуры контроллера, методов передачи данных, а также самих двигателей был написан новый программный модуль. Отдельно необходимо упомянуть процесс коммутации для включения двигателей. При процессе инициализации он выполняется однократно и состоит из 4 основных этапов:

1. Определение положения якоря: линейный двигатель обычно оснащен датчиками положения, такими как энкодеры или датчики Холла. Эти устройства определяют текущее положение якоря относительно статора. На основе этой информации система управления решает, когда и каким образом следует переключить ток в обмотке.

2. Переключение фаз: для создания движущего усилия в линейной машине используется несколько фаз (обычно три). Ток подается на одну или несколько фаз таким образом, чтобы создать магнитное поле, которое будет взаимодействовать с полем постоянного магнита или электромагнитов якоря. Когда якорь перемещается вдоль статора, фазы должны переключаться так, чтобы направление силы оставалось постоянным.

3. Электронная коммутация: электронная коммутация осуществляется с помощью силовых полупроводниковых ключей, таких как транзисторы IGBT или MOSFET. Они управляются контроллером, который получает сигналы от датчиков положения и подает соответствующие команды на ключи. Этот процесс позволяет плавно изменять направление тока в каждой фазе, обеспечивая плавное движение якоря.

4. Регулирование скорости и ускорения: контроллер также управляет скоростью и ускорением якоря путем изменения частоты и амплитуды подаваемого напряжения. Это достигается за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ), которая позволяет точно регулировать мощность, подводимую к двигателю.

Профиль движения сканирующей станции показан на рисунке 2.11. После реализации всех функций процесс интеграции можно считать выполненным.

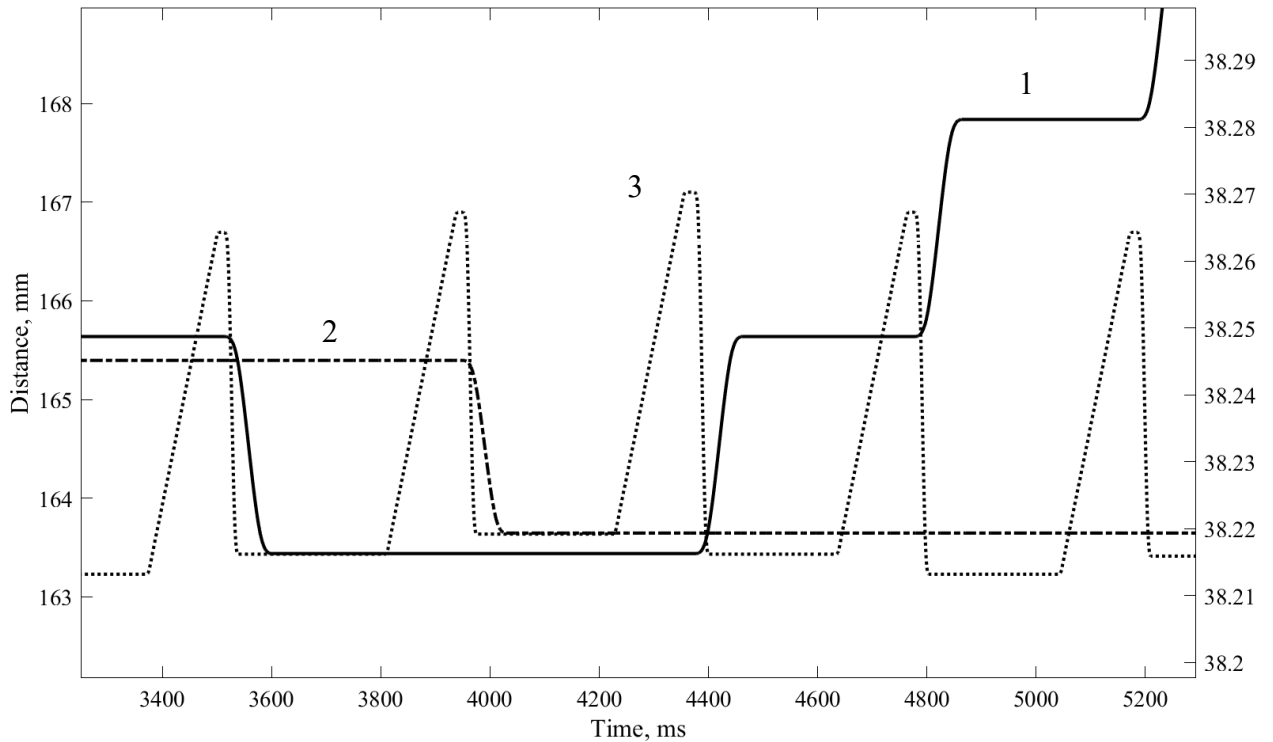


Рисунок 2.11 – Профиль движения сканирующей станции. 1 – горизонтальное перемещение (X), 2 – горизонтальное перемещение (Y), 3 - вертикальное перемещение.

2.3 Новый алгоритм кластеризации

После интеграции нового двигателя управления движением столика MIC1 были также добавлены новая система захвата изображения, а также оптика. Это объектив NICON 10x с числовой апертурой 0,5 и камера Mikrotron EoSens 4CXP с размером матрицы 21 мегапиксель и общим разрешением 5120 x 4096 пикселей. За счет такого сочетания параметров поле зрения было увеличено по сравнению с предыдущим (рисунок 2.12, желтый прямоугольник). Это дало возможность увеличить скорость сканирования примерно в 5 раз, тем не менее за счет большего поля зрения увеличилось и количество кластеров. С 40000 при средней плотности загрузки до 200000 на одно поле зрения. Существующий алгоритм не предполагал такого существенного количества кластеров на одном поле зрения и был разработан новый алгоритм кластеризации, который предполагает разделение изображения на отдельные объекты, каждый из которых состоит из 16 пикселей, расположенных в форме квадратной матрицы размером 4×4. Это позволило не ограничиваться в количестве кластеров и продолжать исследования с новым оборудованием.

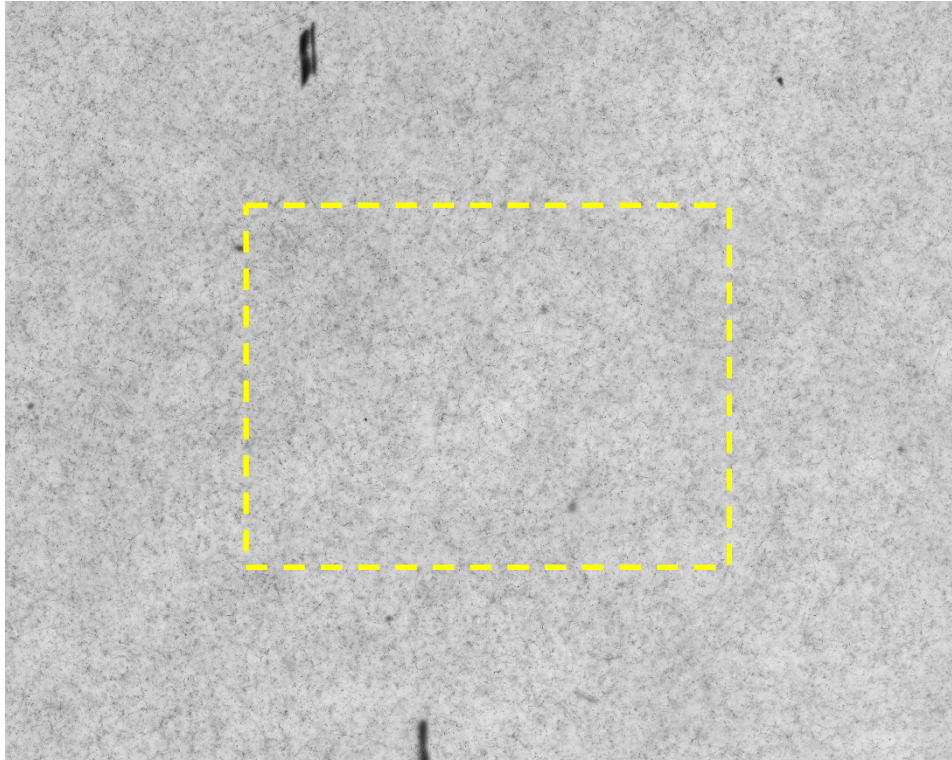


Рисунок 2.12 – Изображение одного поля зрения в ядерной эмульсии. Желтый прямоугольник показывает границы поля зрения до модернизации.

Каждый пиксель в матрице имеет свое уникальное положение на исходном изображении. Всего существует 65536 различных комбинаций расположения пикселей внутри такой матрицы.

Пиксели могут быть представлены в двоичной системе, где черный цвет обозначается как 1, а белый – как 0. Эти двоичные значения легко конвертируются в десятичные путем простого преобразования битов. Матрица 4×4 может быть представлена одним десятичным числом в диапазоне от 0 до 65535.

Далее создается база данных, содержащая информацию о каждой ячейке. В ней хранится информация о количестве кластеров, маске каждого кластера, сжатой маске возможных соседей кластера, а также количестве пикселей в каждом кластере. Маска представляет собой десятичное число, которое описывает набор битовых значений в матрице. Доступ к информации осуществляется через индекс, соответствующий матрице размером 4×4 .

После разделения изображения на отдельные объекты, с помощью базы данных определяются кластеры. Затем происходит их объединение путем сравнения масок соседей с соседними кластерами. Как только все кластеры будут объединены, алгоритм завершает свою работу.

Во время инициализации создается, либо считывается уже созданная, база данных по каждой возможной ячейке. База данных состоит из массива структур, включающих в себя информацию о количестве кластеров в данной ячейке, а также внутреннего массива структур, состоящего из 8 элементов (максимально возможное количество кластеров в ячейке матрицы 4×4). Уже внутренний массив структур включает в себя маску кластера, сжатую маску возможных соседей, а также количество пикселей в кластере.

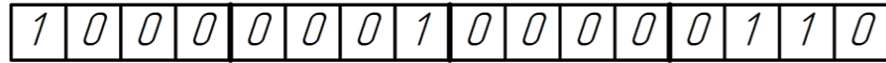


Рисунок 2.13 – Бинарное представление числа 33030

Деля его на блоки по 4, получается матрица 4×4 (рисунок 2.14)

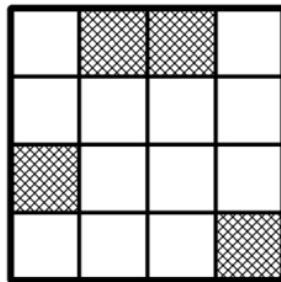


Рисунок 2.14 – Представление числа 33030 в матрице 4×4

Как видно из рисунка, данный объект имеет 3 кластера, два из которых имеет по 1 пикселю и один имеет 2 пикселя. Отдельно записывается маска каждого и них (рисунок 2.15).

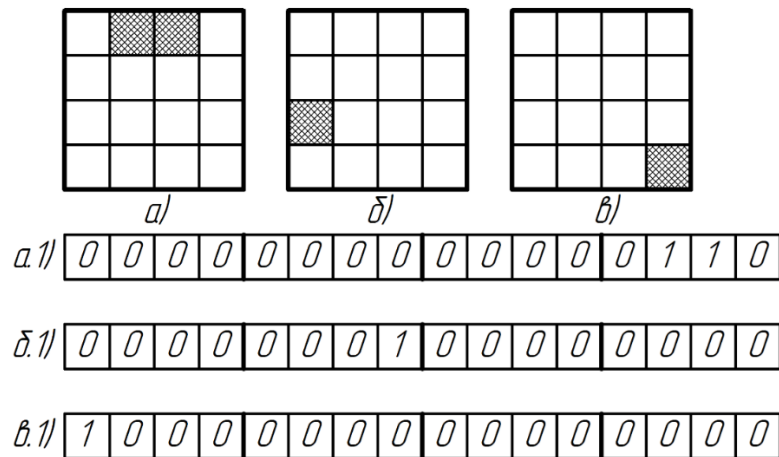


Рисунок 2.15 – Представление 3 кластеров в матрице числа 33030, а) 6, б) 256, в) 32768

Для последующей сшивки кластеров, которые разделены на несколько ячеек необходимо иметь также маски возможных соседей каждого кластера (рисунок 2.16).

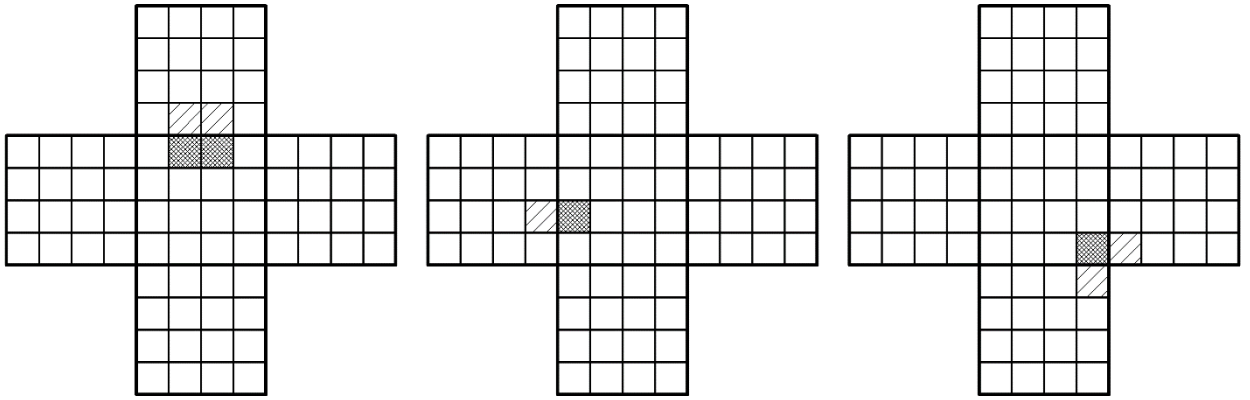


Рисунок 2.16 – Представление масок соседей возможных продолжений кластеров

Т. е. для кластера с маской 6 (первый слева в рисунке 2.16) маски его соседей будут выглядеть следующим образом (рисунок 2.17).

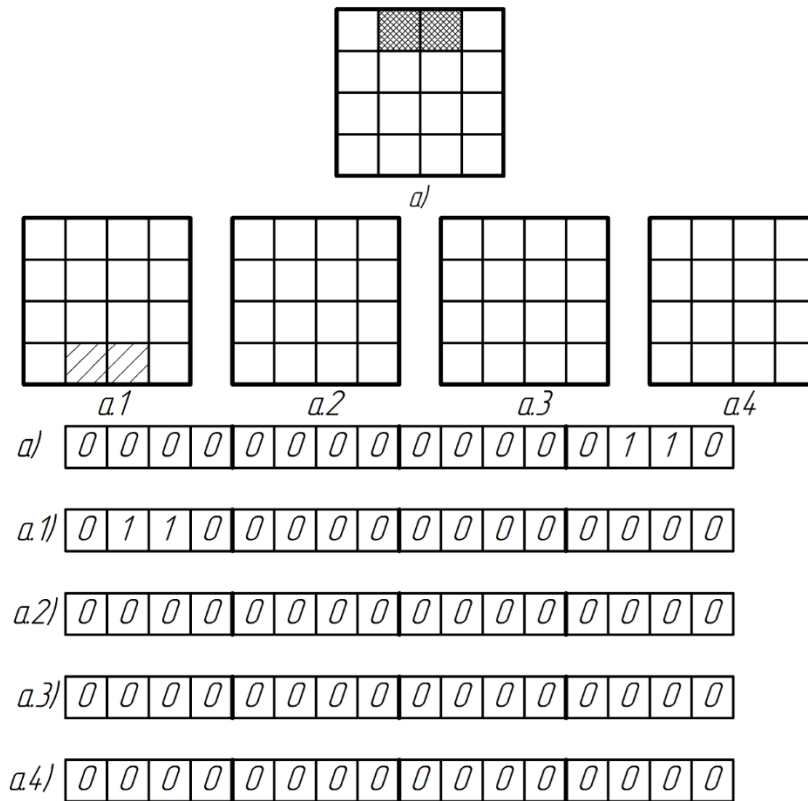


Рисунок 2.17 – Представление масок соседей, а) 6, а.1) 24576, а.2) 0, а.3) 0, а.4) 0

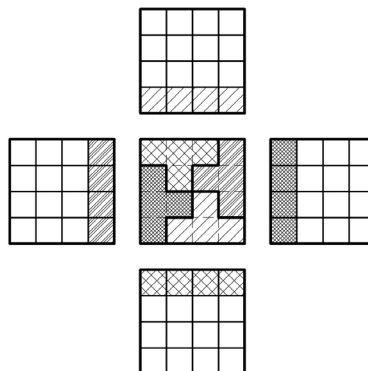


Рисунок 2.18 – Чертеж объединения 4 масок соседей в одну

Как видно из рисунка 2.18 в каждой маске соседей максимально возможное количество пикселей равно четырем. Это дает возможность объединить их в одну с учетом их расположения. При этом необходимо сдвинуть угловой пиксель (ячейку) в центр для того, чтобы поместились все соседние пиксели.

После формирования массива структур функцию инициализации можно считать завершенной. Алгоритм описанный выше выполняется единообразно, при отсутствии сохраненной базы данных, либо считывается с уже сформированной базы данных.

Таким образом получаем структуру из 8 элементов (максимально возможное число кластеров в ячейке 4x4), (рисунок 2.19а), включающую в себя структуру масок пикселей (рисунок 2.19б), 4 объединенных соседей и количество пикселей в кластере. Сформированная база данных состоит из 65536 элементов (максимальное число сочетаний из 16 пикселей), где обращение к ним возможно как к индексу.

```
struct BitMask
{
    CellClust cls[8];
    byte ncl;
};
```

а)

```
struct CellClust
{
    ushort pix; // маска пикселей
    ushort nbr; // маска 4 объединенных соседей
    byte npx; // количество пикселей
};
```

б)

Рисунок 2.19 – Структура базы данных масок

При считывании данных по пикселям возникает проблема несоответствия размеров. Т. е. размер поступающего изображения не кратен размеру матрицы. Для решения этой проблемы формируются добавочные матрицы (рисунок 2.20), состоящие из пустых пикселей.

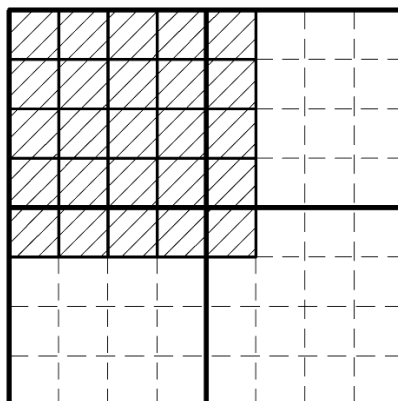


Рисунок 2.20 – Добавочные матрицы

Осуществив переход из бинарного представления данных в десятичные, мы можем обращаться к ранее сформированной структуре данных и выносить все необходимые параметры ячейки, т. е. количество кластеров, маска каждого кластера, количество пикселей, есть ли у кластера соседи.

Далее происходит проверка в бесконечном цикле маски соседней ячейки (ее кластеров) с распакованной маской возможного соседа кластера. Т. е. на рисунке 2.21 кластера есть два возможных соседа снизу и справа. И эти маски проверяются с реальными значениями ячеек справа и снизу. Операция побитового сравнения требует мало ресурсов. Если все-таки выходит совпадение производится приравнивание меток к минимальной и идет последующая итерация по сшивке. Когда все метки соседей закончат изменяться, цикл закончится. Как итог мы получаем все кластеры (их количество на данном этапе такое же), при этом с метками, которые показывают их принадлежность к какому-то большому кластеру.

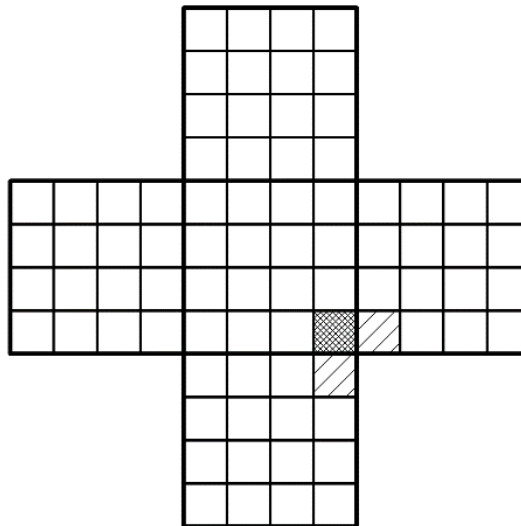


Рисунок 2.21 – Маски соседей для данного кластера (маска равна 32768)

Глава 3. Разработка 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, решение этого вопроса имеет важнейшее значение для понимания свойств ядерной материи. Крупнейшие экспериментальные лаборатории по всему миру занимаются синтезом сверхтяжелых ядер [99; 100]. Прежде всего, представляет интерес проверка предсказания значительного увеличения стабильности ядер вблизи магических чисел $Z = 114$ и $N = 184$ (N – число нейтронов), которое могло бы приводить к существованию в этой области "островов стабильности" сверхтяжелых ядер. Подтверждения этого предсказания получены, в частности, в экспериментах под руководством Г. Н. Флерова и Ю. Ц. Оганесяна на ускорителе Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (ЛЯР ОИЯИ) [101], где были открыты ядра элементов со 105-го по 118-ый. Время жизни некоторых из этих ядер составляет несколько секунд и даже минут, что в десятки тысяч раз превышает время жизни ядер с меньшим зарядом.

Как уже было показано выше в тексте диссертации, трековая методика дает возможность получать приоритетные результаты, чрезвычайно важные для понимания физической картины мира. Диэлектрические трековые детекторы, в том числе изготовленные из стекла, обладают высокой эффективностью обнаружения тяжелых ионов и низкой чувствительностью к фоновому излучению и широко используются в экспериментальной физике, в том числе в физике тяжелых ионов [102–106]. Для ядерно-физических исследований особый интерес представляют спектрометрические свойства диэлектрических детекторов, а именно пропорциональность размеров травимых дефектов энергии, массе и атомному номеру Z тяжелой частицы, замедляющейся в детекторе до остановки. Трек ионизирующей частицы выявляется в диэлектрике, когда линейная плотность ионизации, произведённой частицей вдоль траектории, превышает некоторое пороговое значение для данного материала. Порог чувствительности для каждого материала соответствует минимальной плотности ионизации, выше которой определённый ион образует трек со 100%-ной эффективностью, и определяется эмпирически. Требованиям представленных в данной работе экспериментов в качестве материала детектора удовлетворяет фосфатное стекло, которое обладает 100% чувствительностью к ионам с $Z > 20$ с энергиями выше 20 МэВ [107].

В данной работе было выполнено исследование возможности использования фосфатного стекла в качестве трековых детектора для регистрации осколков синтезированных сверхтяжёлых ядер на Фабрике сверхтяжелых элементов ОИЯИ.

Принцип действия диэлектрического детектора основан на эффекте разрушения локальной кристаллической структуры материала по траектории проникновения быстрого тяжелого иона. Вследствие прохождения многозарядного иона в диэлектрическом детекторе возникает скрытое изображение в форме остаточных дефектов вдоль траектории частицы - латентный трек. В результате химического травления на месте латентного трека образуется фигура травления, представляющая собой пустотелый канал, который совпадает с латентным треком по направлению и значительно превосходит его в диаметре. В зависимости от продолжительности химического травления фигура травления может совпадать по длине с латентным треком или быть короче его. На разных стадиях травления и в зависимости от избирательности травления материала фигура травления принимает различные геометрические формы – цилиндра, конуса, полусферы и др. [108]. Протравленные следы, характерные размеры которых составляют несколько микрон, могут быть исследованы под микроскопом.

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. Корреляция между скоростью травления в области возникшего скрытого следа и потерями на ионизацию стала основой для определения характеристик частицы. Идентификация тяжелых ядер в диэлектрических детекторах проводится путем анализа геометрических параметров вытравленных треков, поскольку масштаб радиационного повреждения диэлектрического материала пропорционален заряду частицы.

Травление включает пять последовательных этапов: диффузию реагента к поверхности, адсорбцию реагента, поверхностную химическую реакцию, десорбцию продуктов реакции и диффузию этих продуктов от поверхности. Общая скорость процесса лимитируется самой медленной (контролирующей) стадией. В случае селективных травителей контролирующим фактором является химическая реакция, при этом отличия в скоростях травления между различными кристаллографическими направлениями могут достигать одного порядка величины и выше. Травление в растворах фтористоводородной кислоты (HF) и гидроксида натрия (NaOH) обладает тенденцией к селективности.

3.1 Химический состав использованных фосфатных стекол

На первом этапе проводилось исследование характеристик образцов фосфатных стекол марок ГЛС-22 и КНФС-3 путем их калибровочных облучений (на пучке ионов $^{132}\text{Xe}^{26+}$ резонансного циклического ускорителя ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ) и последующей работе по определению оптимального состава травящего раствора для анализа характеристик треков на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ. Стекла ГЛС-22 были приобретены ранее институтом и использовались на начальном этапе для апробации создаваемой методики. Стекла КНФС-3 современного производства Лыткаринского завода оптического стекла были закуплены специально для данной исследовательской работы.

Фосфатные стекла представляют собой неорганические диэлектрики с широким классом составов, в которых основной стеклообразующей компонентой является пятиокись фосфора P_2O_5 . Примерный массовый состав использованных образцов фосфатных стёкол представлен в таблице 3, а некоторые их физико-химические свойства приведены в таблице 5.

Получение оптического фосфатного стекла КНФС-3 осуществляется по технологической схеме, позволяющей создать стекло с высокой однородностью и с улучшенными термооптическими характеристиками (высокой термостойкостью и теплопроводностью, низким значением температурного коэффициента линейного расширения). Указанные свойства имеют принципиальное значение для материала активных элементов, работающих в условиях высоких мощностей энергии (например, на ускорителях), поскольку заметную роль в таких установках приобретают нелинейные процессы.

Поскольку состав фосфатного стекла непостоянен, для изучения свойств конкретного детектора необходимо проведение калибровочных экспериментов на ускорителях с точным знанием энергии пучка ионов и их заряда. В рамках данной работы были проведены тестовые эксперименты на резонансном циклическом ускорителе ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ с целью определения возможности регистрации многозарядных ионов и их характеристик с помощью детекторов на основе фосфатного стекла выбранной марки [109]. Размеры образцов варьировали в интервале от 10×2 мм до 10×10 мм при толщине 4 мм, что обеспечивало баланс между требуемой оптической прозрачностью и механической прочностью. Целью калибровочного облучения стеклянных образцов было установление зависимостей геометрических параметров треков от заряда и энергии ионов.

Таблица 3 - Массовый состав фосфатных стекол ГЛС-22 и КНФС-3

Химический состав, % массы	ГЛС-22	КНФС-3 (патент)	КНФС-3 (усредненные данные)
P ₂ O ₅	49-65	60-66	63
Al ₂ O ₃	2-9	4-8,5	6
B ₂ O ₃	1,6-10	0,2-3	1,5
Li ₂ O	0,9-9,5		
Na ₂ O		0,5-3,5	2
K ₂ O		4,5-11,5	8
Nd ₂ O ₃	0,5-7,5	0,5-5	2
CeO ₂		0,1-1	0,5
BaO		0,8-12	5
SiO ₂		0,5-3	1,5
SrO		2-17	9
CaO		0,1-3	1,5

Таблица 4 - Некоторые физико-химические параметры фосфатных стекол ГЛС-22 и КНФС-3

Параметр	Значение параметра	
	ГЛС-22	КНФС-3
Концентрация ионов неодима ($\times 10^{20}$ ион/см ³)	2	3,5
Плотность (г/см ³)	3,52	2,87 \pm 0,03
Температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур 20-300 $^{\circ}$ C ($\times 10^{-7}/C^{\circ}$)	110	115
Температура трансформации (верхняя температура отжига) ($^{\circ}$ C)	490	
Температура деформации ($^{\circ}$ C)	550	
Термостойкость ($^{\circ}$ C)	38	54*
Модуль упругости (Юнга) ($\times 10^{-9}$, Па)	55,8	
Коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона), $\mu 1$	0,28	
Относительная твердость по сошлифованию (относительно стекла марки К8)	0,32	

Группа химической активности по воздействию (ГОСТ 13917-82): - влажной атмосферы - кислоты	Д 3	В 2
Пузырность		ø до 0,2 мм; до 30 шт/кг
Бессвильность	Свили не допускаются	

Важным фактором, влияющим на эффективность регистрации многозарядных ионов в диэлектрических детекторах, является плотность облучения. При больших плотностях облучения возрастает вклад перекрывающихся треков, что может повлиять на линейность характеристик детектора. В данной работе анализ этого фактора был осуществлен на этапе моделирования. Для оптимизации режимов облучения стёкол на пучках ускоренных ионов была создана компьютерная программа, позволяющая по заданным размерам следов частиц, образовавшихся после травления на поверхности стекла, показать степень заполнения ими исследуемой поверхности при различных плотностях загрузки. Начальные значения размеров следов были определены на основе тестовых экспериментов. Серия расчетов с разными размерами протравленных треков и разной плотностью показала, что наибольшая эффективность регистрации треков тяжёлых ионов при сохранении линейности характеристик детектора достигается при плотности облучения $\sim 10^4$ – 10^5 частиц·см⁻², в зависимости от возможных размеров следов [109].

3.2 Калибровочные измерения для стекла ГЛС-22

На начальном этапе были изготовлены две группы образцов фосфатного стекла марки ГЛС-22 для двух углов падения пучка (0° и 60° относительно нормали), каждая группа включала три образца различной толщины (2 мм, 3 мм и 4 мм), согласно рисунку 3.1.

Образцы фосфатного стекла ГЛС-22 облучали в транспортировочном канале выведенного пучка ионов $^{132}\text{Xe}^{26+}$ резонансного циклического ускорителя ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ. Энергия ускоренных ионов ксенона составляла 1,16 МэВ/нуклон. Регулируемый по фотоэлектронному умножителю (Hamamatsu H-10721-110) поток ионов ксенона достигал значения 1300 частиц/(сек·см²). За время экспозиции накопленная доза составила $6,2 \times 10^4$ частиц/см² при угле 0° относительно нормали к поверхности (для первой группы стёкол) и $3,1 \times 10^4$ частиц/см² при угле 60° (для второй группы стёкол) (рисунок 3.2).

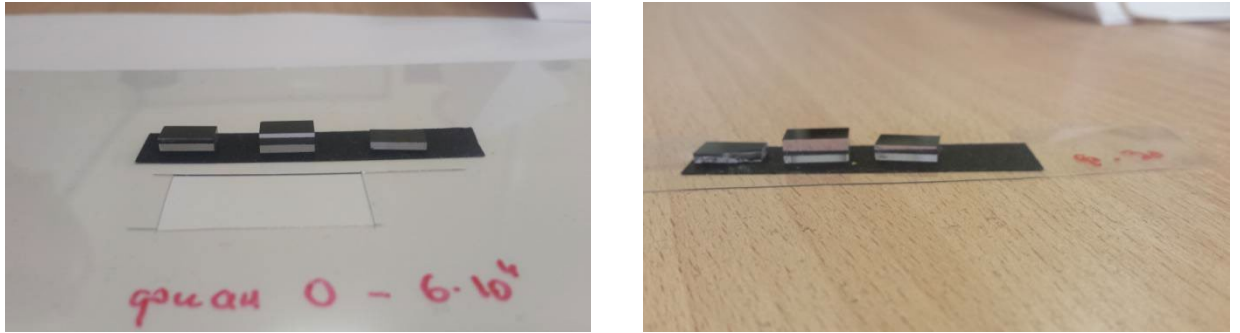
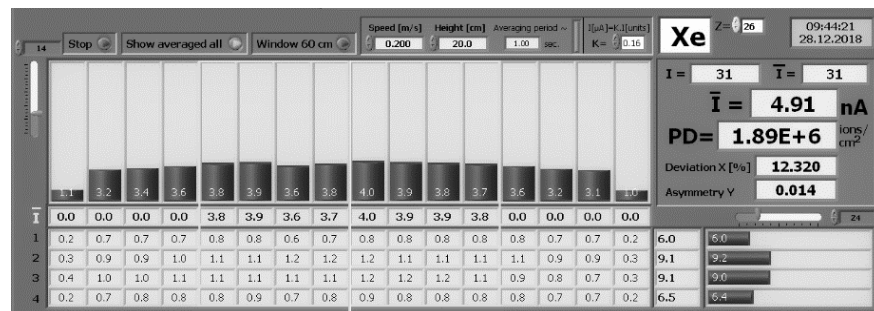


Рисунок 3.1 – Группы образцов фосфатного стекла ГЛС-22, подготовленные для облучения.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Облучение образцов фосфатного стекла на пучке ионов ксенона: а) размещение модуля облучения; б) распределение потока ионов $^{132}\text{Xe}^{26+}$ перед модулем облучения.

При разработке методики обработки облученных стекол первостепенное значение имеет выбор оптимального режима химического травления. В зависимости от регистрируемых частиц и состава стекла, используют различные средства и режимы химического травления, в которых варьируются реагенты, концентрации, температуры и длительность травления.

В процессе травления материал удаляется из образца путём его обработки в травящем растворе кислоты или щёлочи либо равномерно (выравнивающее травление), либо неравномерно (избирательное травление). При избирательном травлении отдельные участки поверхности травятся с различной скоростью, вследствие чего происходит углубление неоднородностей, характеризующих дефекты её структуры. Повышенной скоростью травления характеризуются участки поверхности, имеющие макро- и микродефекты, такие как трещины, царапины, дислокации, вакансии, примесные атомы в кристаллической решетке, латентные треки.

В представленных экспериментах поврежденные заряженной частицей области материала реагируют с травящим агентом более интенсивно, чем неповрежденные, и в результате избирательного травления образуются характерные конусы размером порядка нескольких микрон – треки травления ионов. Для образования видимого трека травления необходимо, чтобы скорость проникновения травящего раствора в зону радиационных повреждений – скорость травления вдоль трека V_T – превышала скорость травления неповрежденного материала V_M . При травлении треков разных ионов, начиная с некоторого времени травления, скорость увеличения размера лунок становится различной, в зависимости от заряда. При длительном травлении контрастность треков под микроскопом постепенно уменьшается, что затрудняет их идентификацию. Параметры полученных треков могут быть оценены количественно с использованием оптического микроскопа.

Протестированные в данной работе травящие растворы (травители), плавиковая кислота HF и гидроксид натрия NaOH, являются избирательными. Плавиковая кислота представляет собой водный раствор фтороводорода с содержанием последнего до 40%. При контакте со стеклом она, реагируя с двуокисью кремния, разъедает его. В зависимости от сорта стекла и концентрации травящего раствора, время действия кислоты может колебаться в довольно больших пределах, от 2 до 30 мин. Гидроксид натрия - сильное основание, также вступающее в химическую реакцию с двуокисью кремния. По сравнению с плавиковой кислотой, реакция протекает гораздо медленнее.

Травление образцов первой группы стёкол осуществлялось поэтапно в 40%-м растворе фтористоводородной кислоты (HF). После каждого этапа травления образцы сканировали на автоматическом микроскопе комплекса ПАВИКОМ. Изображения на последовательных этапах травления представлены на рисунке 3. Как следует из рисунка 3в, длительное (в течение 7 часов) воздействие фтористой кислоты привело к тому, что поверхность стекла была стравлена на глубину, превосходящую глубину треков ионов (следы ионов отсутствуют).

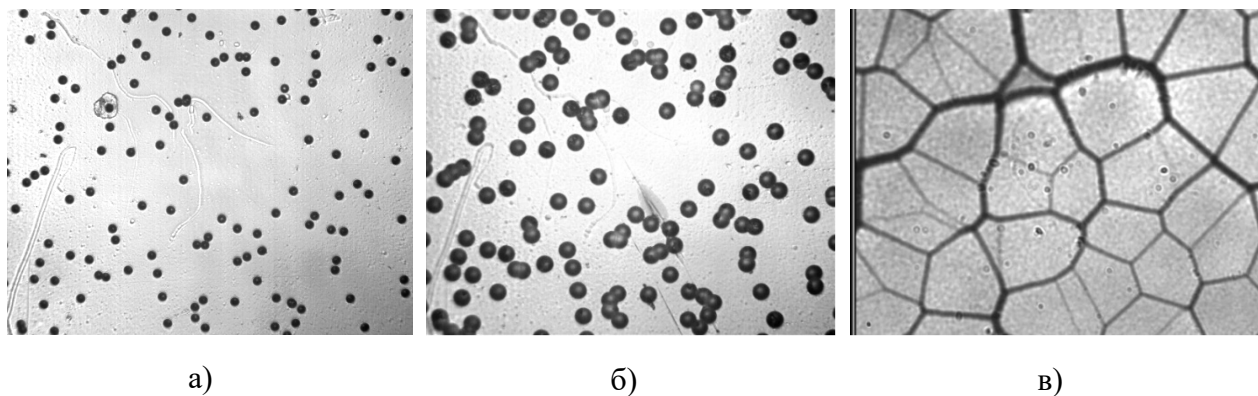


Рисунок 3.3 – Изображения поверхности одного из образцов первой группы после травления во фтористоводородной кислоте в течение а) 20 минут, б) 40 минут, в) 7 часов.

Изображения получены на микроскопе комплекса ПАВИКОМ с использованием объектива 20-кратного увеличения. Размер поля зрения составляет 555×444 мкм.

На рисунке 4 представлены результаты многоэтапного травления образцов второй группы стёкол в растворе гидроксида натрия 10N NaOH.

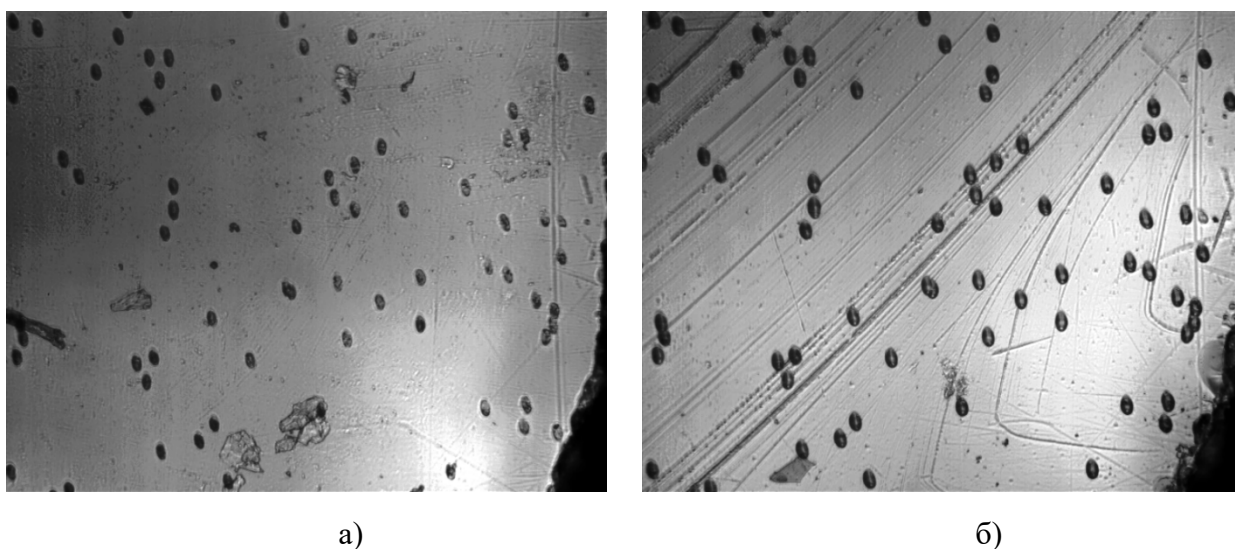
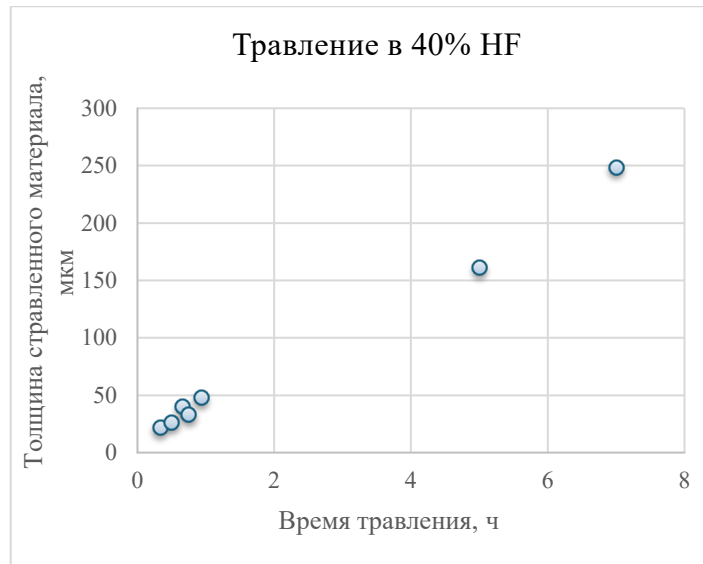


Рисунок 3.4 – Изображения поверхности одного из образцов второй группы после травления в гидроксиде натрия в течение а) 7 часов, б) 9 часов. Изображения получены на микроскопе комплекса ПАВИКОМ с объективом $20\times$. Размер поля зрения 555×444 мкм.

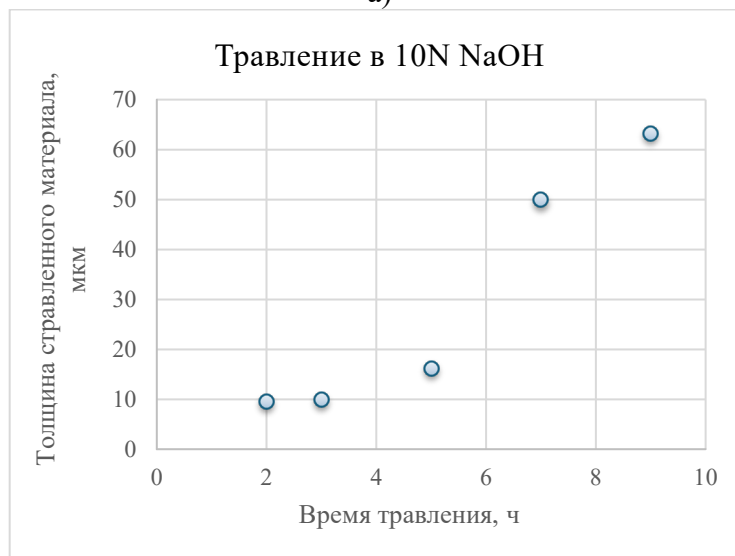
На рисунке 5 представлена экспериментальная зависимость толщины удаленного слоя материала от времени травления облученных образцов стекла марки ГЛС-22 в растворах плавиковой кислоты и гидроксида натрия.

Полученные результаты позволили определить диапазоны оптимального времени травления образцов для каждого травителя (до 1 часа в плавиковой кислоте и от 5 до 10 часов в гидроксиде натрия).



Средняя скорость травления материала $\sim 48,7$ мкм/ч

а)



Средняя скорость травления материала $\sim 5,1$ мкм/ч

б)

Рисунок 3.5 – Зависимость толщины стравленного материала (мкм) от времени травления облученных образцов стекла марки ГЛС-22 а) в 40% р-ре плавиковой кислоты и б) в 10N гидроксиде натрия. Травление производилось при температуре $\sim 22^\circ\text{C}$.

На рисунке 3.6 представлены экспериментальные графики, отражающие изменение геометрических характеристик треков ионов ксенона в зависимости от длительности их травления в используемых растворителях.

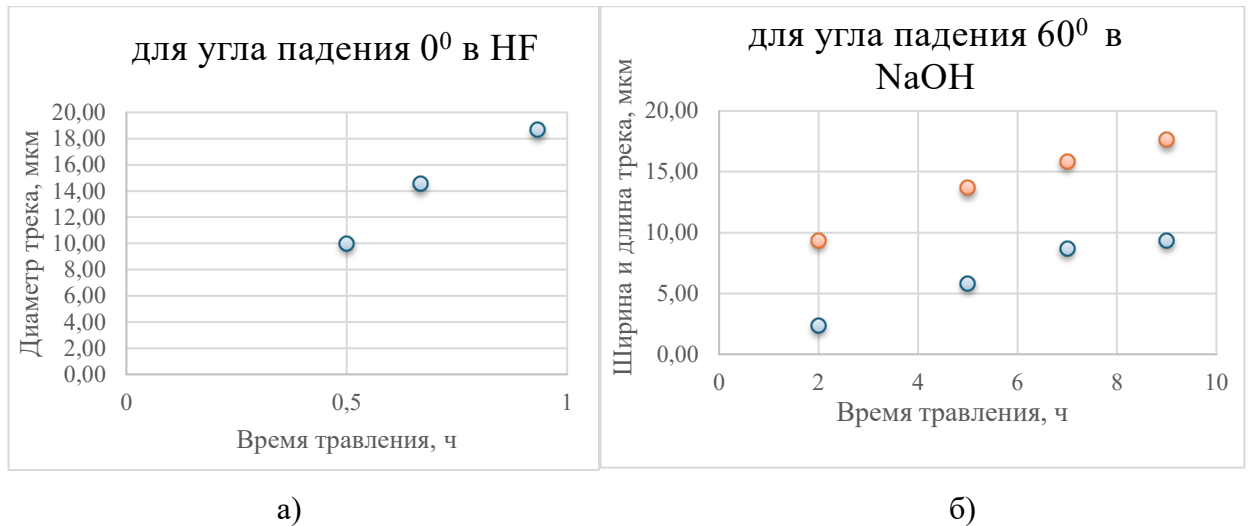


Рисунок 3.6 – Зависимость размеров протравленных треков для разных углов падения ионов от времени травления: а) диаметр в плавиковой кислоте; б) длина (красные точки) и ширина (синие точки) в гидроксиде натрия.

Таким образом, результаты первого калибровочного эксперимента со стеклами ГЛС-22 позволили установить временные интервалы травления облученных образцов в использованных реактивах. Кроме того, было выявлено, что необходимо провести более точные измерения геометрических размеров и массы образцов фосфатного стекла как до, так и после процедуры травления.

3.3 Определение толщины стравленного слоя

При определении длины трека необходимо учитывать толщину слоя, удаленного с поверхности образца. Эту величину следует прибавлять к наблюдаемой под микроскопом длине трека. Практический опыт показывает, что стандартный микрометр не обеспечивает достаточной точности (~1 мкм) для измерения толщины стравленного слоя Δ , значение которой на отдельных этапах травления колеблется в диапазоне от 0,3 до 0,5 мкм.

Изначально толщина стравленного слоя Δ определялась несколькими методами:

(1) На основе результатов взвешивания образца до и после травления по формуле

$$\Delta = \frac{m_{\Delta}}{2\rho(L_1 D_1 + L_1 h_1 + D_1 h_1)}$$

где L_1 , D_1 , h_1 - длина, ширина и толщина бруска до травления;

m_1 - масса бруска до травления.

m_2 - масса бруска после травления

$m_{\Delta} = m_1 - m_2$ - стравленная масса,

L_1 , D_1 , h_1 - длина, ширина и толщина бруска до травления,

$\rho=2.7 \text{ г/см}^3=2.7 \cdot 10^{-12} \text{ г/мкм}^3=2.7 \cdot 10^{-9} \text{ мг/мкм}^3$ - плотность фосфатного стекла КНФС-3.

(2) На основе результатов измерений геометрических размеров всех граней образца до и после травления по формуле

$$\Delta = \frac{L_1 D_1 h_1 - L_2 D_2 h_2}{2(L_1 D_1 + D_1 h_1 + L_1 h_1)}$$

где L_1, D_1, h_1 - длина, ширина и толщина бруска до травления,

L_2, D_2, h_2 - длина, ширина и толщина бруска после травления.

(3) Путем прямого измерения одного из геометрических размеров (толщины h) образца до и после травления.

Следует подчеркнуть, что геометрические размеры могут заметно варьироваться в различных участках одного и того же образца (см. рисунок 7). На начальном этапе измерений каждый параметр фиксировался в трёх точках под микроскопом, и результат представлялся в виде диапазона значений с учётом статистической ошибки. Наиболее значимым параметром среди измеряемых величин является D_3 — толщина стекла, отражающая степень удаления материала плоскости, содержащей треки ионов.

Геометрические параметры образца до и после травления, используемые в расчётах, измерялись следующим образом:

До травления:

– L_1 — в одной точке под микроскопом;

– D_1 — в одной точке под микроскопом;

– h_1 — в центральной части образца в трёх точках (для расчётов брали среднее значение).

После травления:

– Размеры L_2 и D_2 не измерялись;

– h_2 — в центре образца в двух точках с каждой стороны (для вычислений использовалось среднее значение).

Измерения геометрических параметров проводились на оптическом микроскопе установки ПАВИКОМ-2 с использованием объектива $8\times$. Взвешивание образцов до и после травления выполнялось на аналитических электронных весах AND HR-100AZG с точностью до 10^{-4} грамма.

Для облегчения расчёта толщины стравленного слоя по измеренным данным была создана специальная программа, интерфейс которой представлен на рисунке 3.7. Пользователь вводит необходимые исходные значения в соответствующие поля, а после нажатия кнопки «Результат» получает итоговую толщину стравленного слоя.

Вычисление толщины стравленного слоя

Начальная длина, мсм
10000

Начальная ширина, мсм
5000

Начальная толщина, мсм
3000

Изменение веса, мг
5

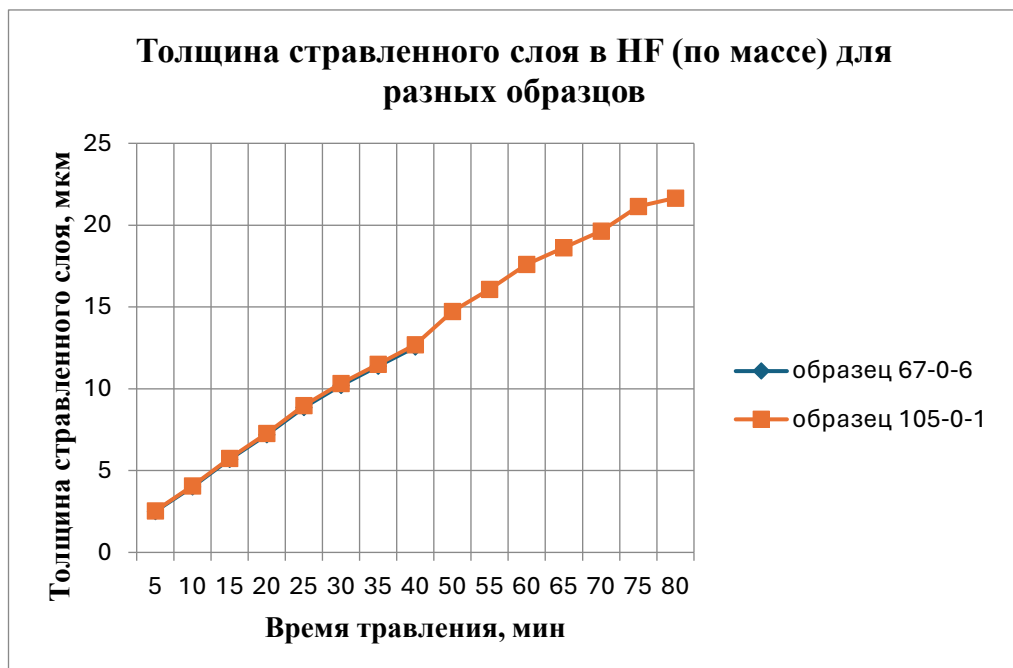
Плотность, г/см³
2.87

Результат

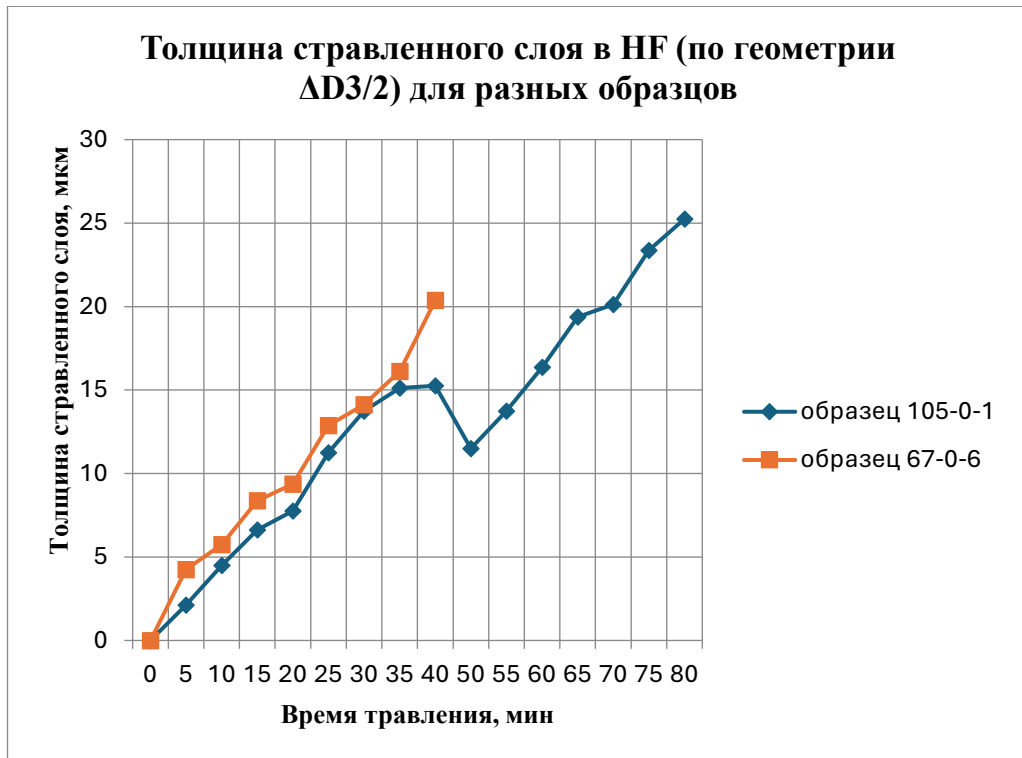
Толщина стравленного слоя, мсм
9,16926

Рисунок 3.7 – Пользовательское окно программа для вычисления толщины стравленного слоя по измеренным параметрам образца.

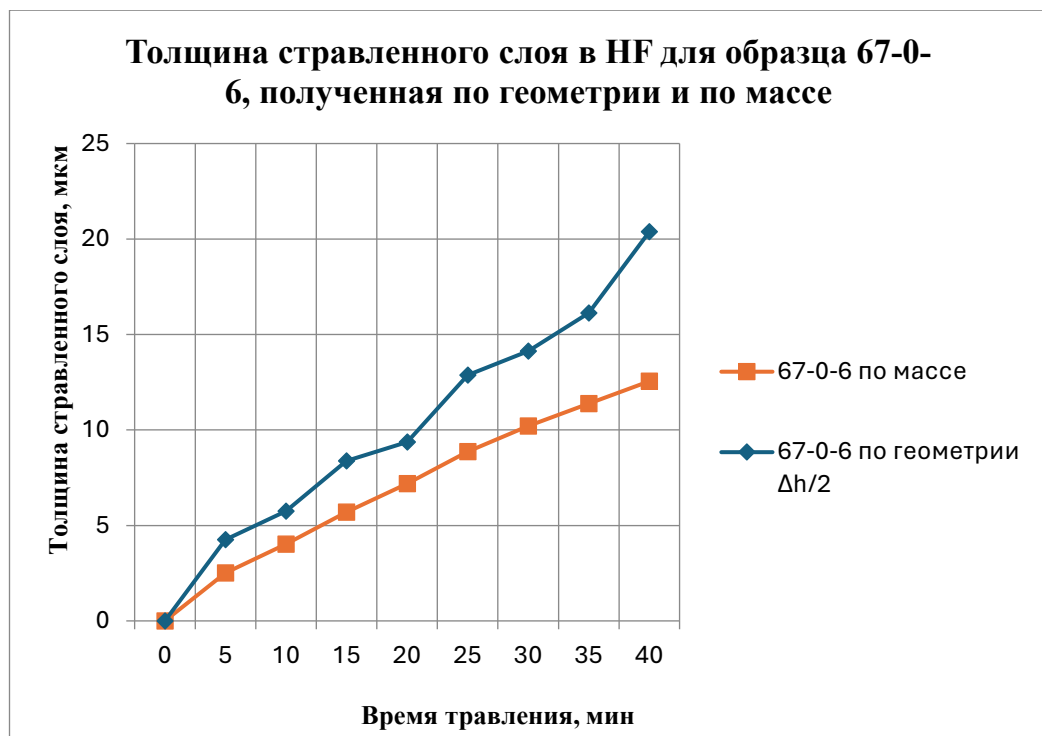
На рисунке 3.8 приведены сравнительные результаты различных методов определения толщины стравленного слоя в плавиковой кислоте (HF) для двух облучённых образцов стекла — 67-0-6 и 105-0-1.



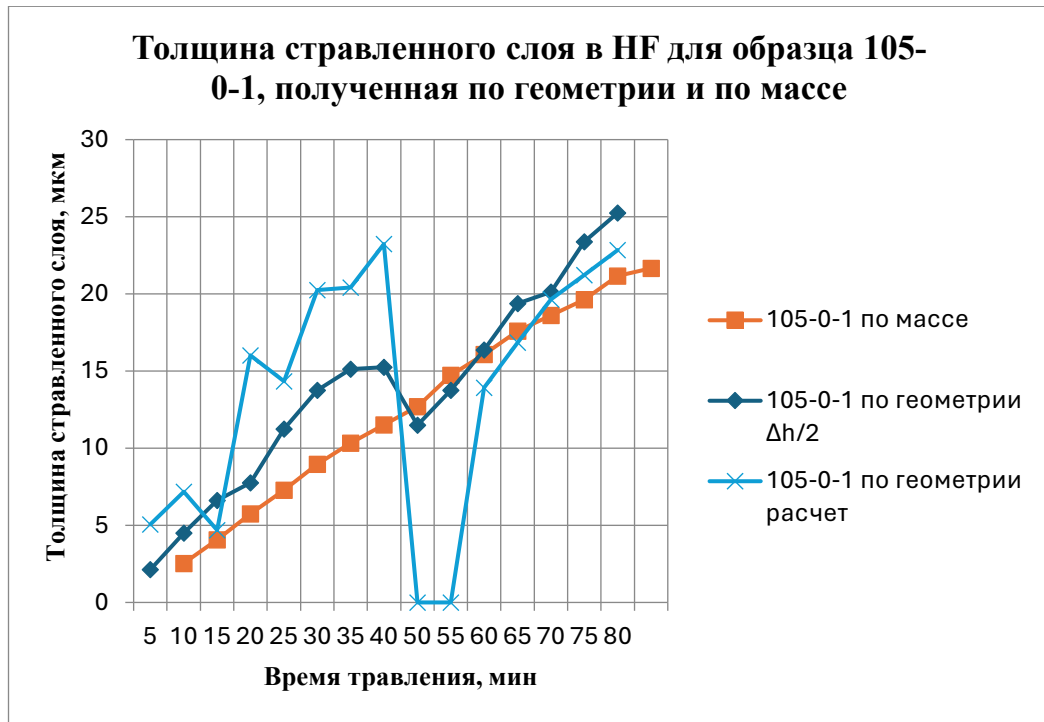
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.8 – Сравнительные результаты разных способов определения толщины стравленного слоя в HF

Данные, представленные на рисунке 3.8 (а), показывают, что значения толщины стравленного слоя, полученные путём измерения массы образца до и после травления, для одинакового времени экспозиции практически совпадают для различных образцов. Это подтверждает высокую точность данного метода оценки толщины стравляемого слоя.

Однако данные, отображаемые на рисунках 3.8 (б–г), основанные на измерениях геометрических характеристик образца до и после травления, демонстрируют значительный разброс. Такая вариативность обусловлена неравномерностью травления по всей поверхности образца и недостатками технологии резки стекла, приводящими к значительным отклонениям размеров граней в разных точках (см. рисунок 3.9). Сопоставление графиков для толщин стравленных слоёв, полученных методами (2) (измерение всех граней) и (3) (оценка толщины образца), демонстрирует, что включение большего числа геометрических измерений в анализ снижает общую точность результатов.



Рисунок 3.9 – Различное качество обработки граней стекл (изображение с микроскопа с объективом 40 \times)

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о том, что наибольшая точность определения толщины травленого слоя достигается посредством взвешивания образца до и после травления с однократным измерением его геометрических параметров перед процессом травления.

3.4 Выбор травящего вещества

В рамках проведённого исследования были испытаны травильные растворы, включающие плавиковую кислоту (HF) и гидроксид натрия (NaOH), которые обладают свойством селективности. Скорость травления такими растворами зависит от структуры обрабатываемой поверхности и наличия на ней скрытых дефектов. Селективные травители выявляют неоднородности поверхности, при которых различные участки подвергаются

травлению с отличающимися скоростями. Показателем селективности является соотношение скоростей растворения под воздействием одного и того же травящего агента. Участки поверхности с макро- и микродефектами, такими как трещины, царапины, дислокации, вакансии, примесные атомы в кристаллической решётке, а также латентные треки, обычно демонстрируют повышенную скорость травления. Образующиеся при этом углубления (ямки травления) могут быть проанализированы как качественно, так и количественно с использованием оптической микроскопии.

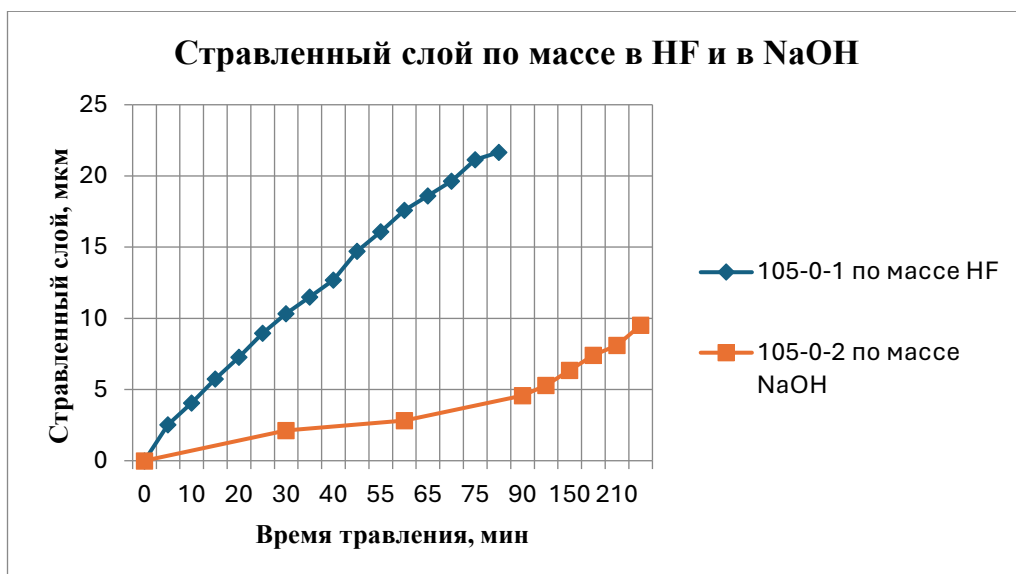
Плавиковая кислота представляет собой водный раствор фтороводорода, содержащий до 40% этого вещества. При взаимодействии со стеклом она вступает в реакцию с диоксидом кремния, который является основным компонентом большинства видов стекла, разрушая его структуру. Процесс травления стекла может осуществляться как чистым 40%-ным раствором плавиковой кислоты, так и разбавленными водными растворами с концентрацией от 1:1 до 1:10. Время воздействия кислоты варьируется в широких пределах – от 2 до 30 минут и более – в зависимости от типа стекла и концентрации используемого раствора.

Гидроксид натрия, известный также как едкий натр, является сильным основанием, которое также вступает в химическое взаимодействие с диоксидом кремния. Эта реакция происходит относительно медленно, однако увеличение температуры ускоряет процесс.

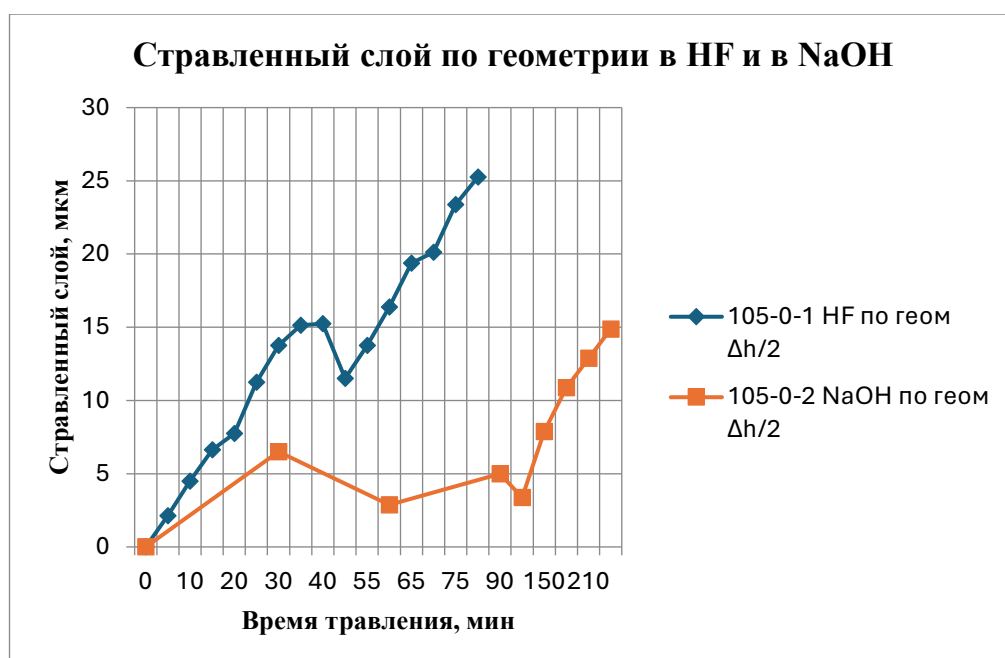
Процесс химического травления включает последовательные этапы обработки образцов: погружение изделия в кислоту, выдерживание в кислоте, извлечение изделия из кислоты, промывку в щелочном растворе и последующую сушку. Во время взаимодействия плавиковой кислоты со стеклом она постепенно испаряется из раствора, снижая свою концентрацию. Одновременно на дне ёмкости накапливается осадок кристаллизованных солей, которые образуются вследствие разрушения стеклянной поверхности. По этой причине через определённые интервалы времени требуется замена кислоты и очистка ёмкости от образовавшегося осадка.

На стадии подбора травильного состава образцы фосфатного стекла КНФС-3, предварительно облученные ионами серебра (Ag), криптона (Kr) и ксенона $^{132}\text{Xe}^{26+}$ подверглись травлению для выявления треков ионов. Часть образцов была обработана раствором плавиковой кислоты 40HF, а другая часть — раствором гидроксида натрия 10N NaOH.

На рисунке 3.10 представлены результаты сравнения толщины удаленного слоя Δ для образцов 105-0-1 и 105-0-2, протравленных в HF и NaOH соответственно.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Результаты сравнения толщины стравленного слоя Δ для образцов, протравленных в HF и в NaOH

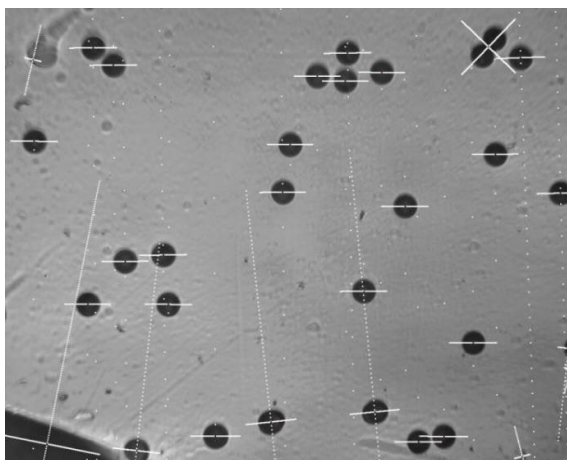
Основываясь на результатах измерений, для последующих исследований была выбрана плавиковая кислота HF. Это решение было обусловлено рядом факторов:

1. Как следует из рисунка 3, время травления в NaOH существенно больше, чем в HF, даже для достижения аналогичных результатов.
2. Даже длительное травление в NaOH, многократно превышающее продолжительность обработки в HF, не гарантирует полного протравливания трека.

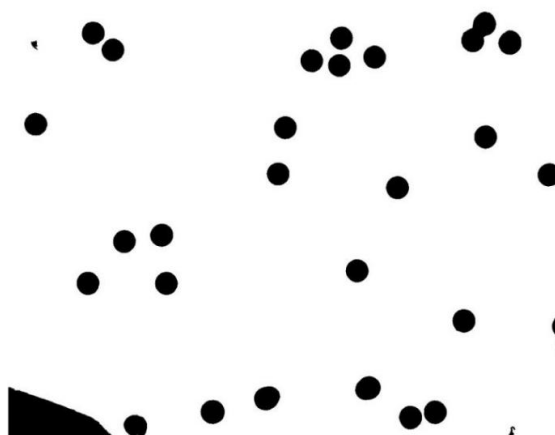
3. Эффективность травления в NaOH сильно зависит от времени подготовки реактивов.

3.5 Алгоритм определения геометрических размеров треков многозарядных ядер

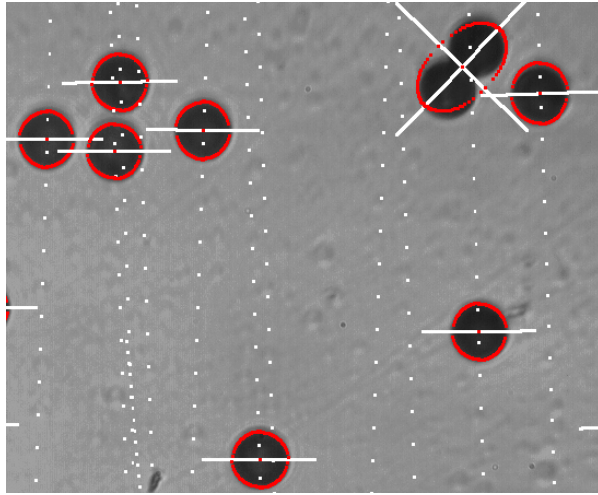
Была разработана и успешно использована программа обработки изображений треков ионов в стекле после травления. Она позволяет выделять такие следы и определять их геометрическую форму. Поскольку трек многозарядного иона на поверхности стекла образует эллипс, в программу включена процедура аппроксимации контура следа эллипсом. Малая ось этого эллипса коррелирует с зарядом и энергией частицы, тогда как большая ось связана с углом её входа в мишень. Наличие калибровочных экспериментов по облучению стекол ионами разных зарядов, энергий и углов падения позволяет построить функцию, которая напрямую связывает измеряемые геометрические характеристики следа с этими параметрами. Программа была использована для обработки образцов фосфатного стекла, облученных ионами ксенона с различными энергиями и углами вхождения. Результаты обработки представлены на рисунках 3.11 и 3.12.



а)



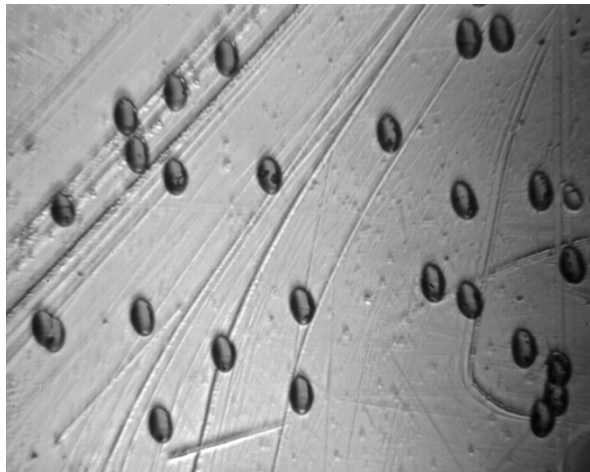
б)



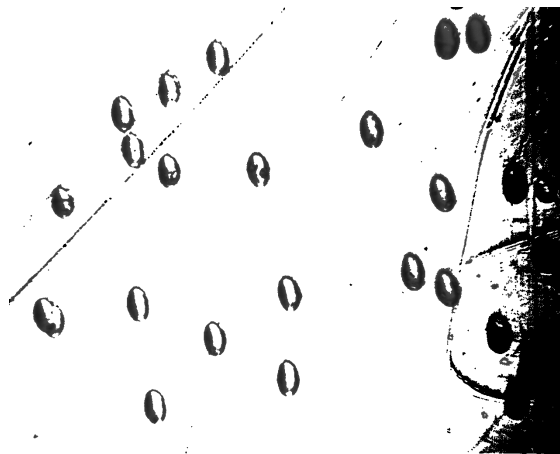
в)

Рисунок 3.12 – Результат обработки следов ионов $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 1 МэВ/А (нормальное падение, стекло ГЛС-22) после травления плавиковой кислотой в течение 20 минут: а) – исходное изображение на микроскопе; б) – результат обработки изображения с помощью разработанной программы; в) – небольшой фрагмент результата обработки.

Диаметр следов 12 мкм.



а)



б)



в)

Рисунок 3.13 – Результат обработки следов ионов $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 1 МэВ/А (под углом 60° к нормали) после травления плавиковой кислотой в течение 9 часов: а) – исходное изображение на микроскопе; б) – результат обработки изображения с помощью разработанной программы; в) – небольшой фрагмент результата обработки. Большая ось эллипса 18 мкм, малая 11 мкм.

3.6 Калибровочные измерения для стекла КНФС-3

Стекла КНФС-3 использовались во втором калибровочном облучении на ускорителе ИЦ-100 ионами $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергиями в интервале от 40 до 160 МэВ.

На рисунке 3.7 представлены фотографии 15 образцов стекла КНФС-3, подготовленных для облучения. В дополнение к основным образцам стекла (образцы 1–11), для оценки количества частиц в пучке использовался контрольный образец в виде лавсановой пленки ПЭТФ толщиной 175 микрон («свидетель»). Калибровка в двух точках «свидетеля» позволила зафиксировать плотность частиц в диапазоне $(5,0\text{--}5,1) \times 10^4$ частиц/см². Образцы 12–15 подвергались облучению отдельными пучками различной интенсивности. Изменение энергии падающих частиц осуществлялось путем размещения поглощающих фольг из различных материалов между пучком и облучаемыми стеклянными образцами.

Для уменьшения энергии ионов были использованы фольги-поглотители из поликарбоната (О-Р-О-СО) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ) различной толщины. Приведены расчетные значения остаточной энергии ионов (оценка энергии получена по программе SRIM) для каждого набора образцов:

– Образцы 1, 2, 3, 4: ПЭТФ толщиной 5 мкм (остаточная энергия около 100 МэВ).

- Образцы 5, 6, 7, 8: Поликарбонат толщиной 10 мкм (остаточная энергия примерно 65 МэВ).
- Образцы 9, 10, 11: ПЭТФ толщиной 12 мкм (остаточная энергия приблизительно 40 МэВ).
- Образцы 12, 13, 14, 15: без использования поглотителей (начальная энергия 160 МэВ).

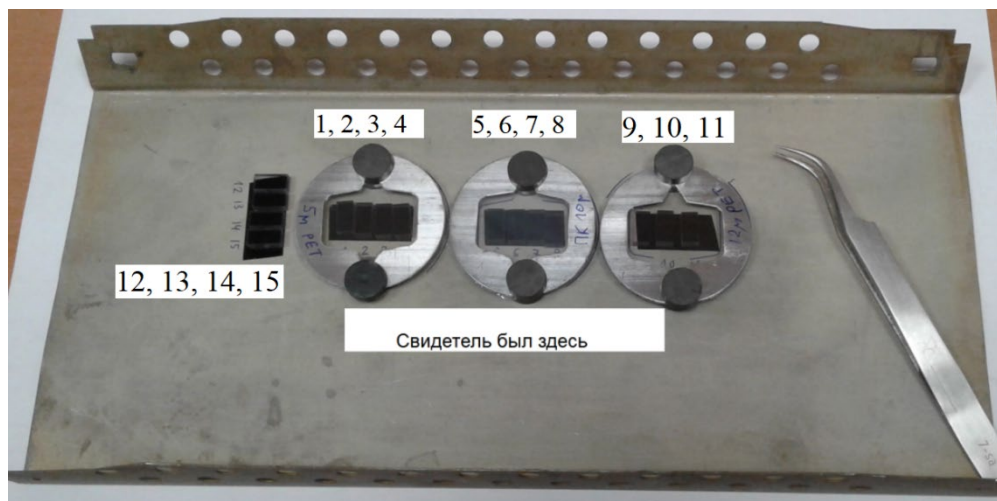
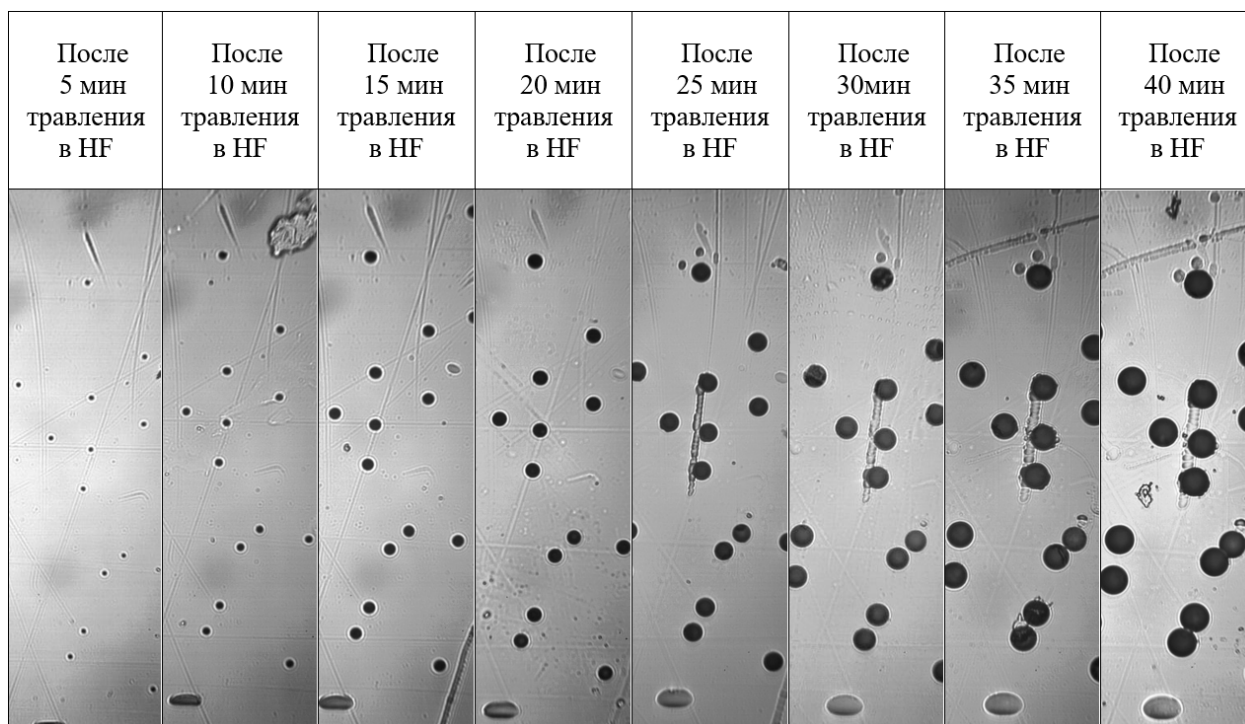
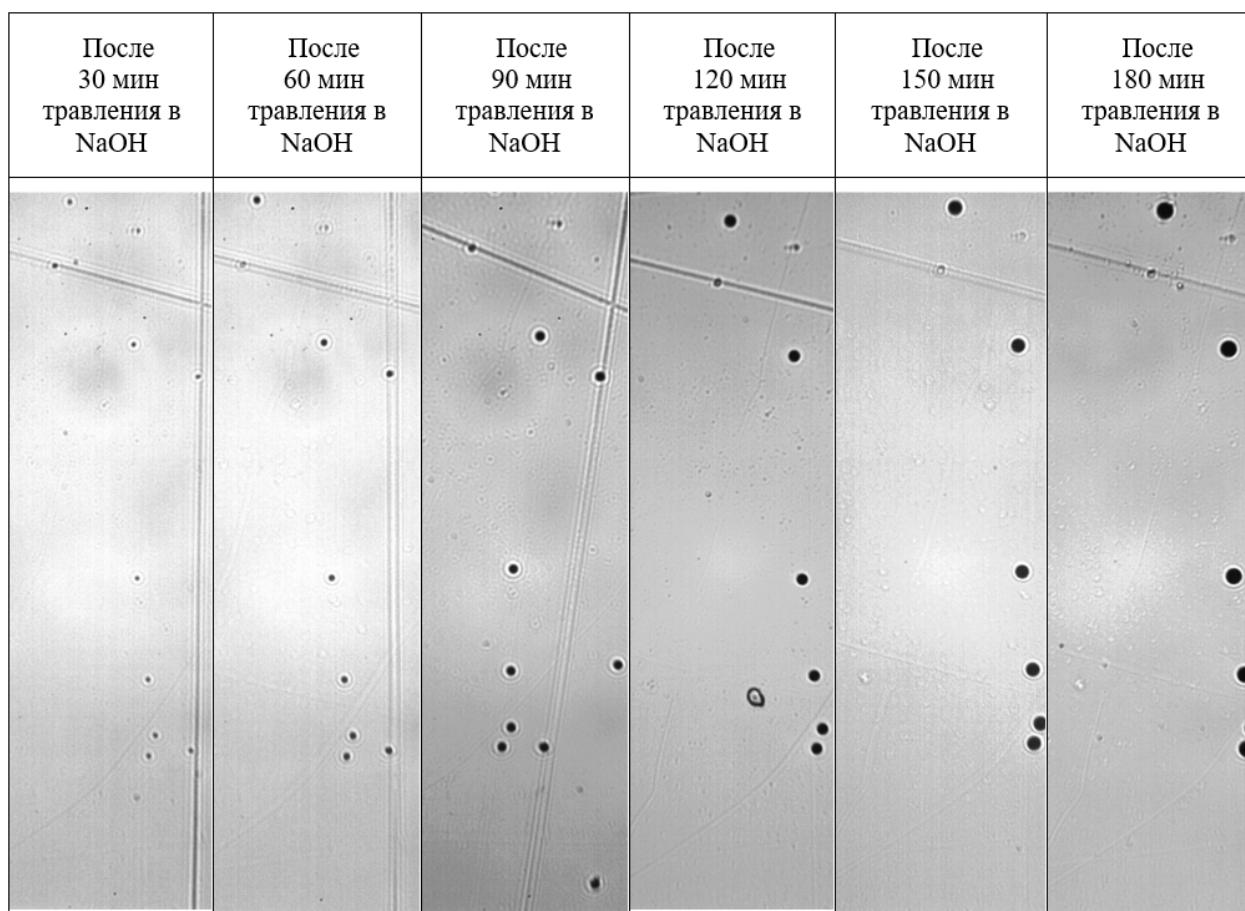


Рисунок 3.7 – Подготовленные для облучения 15 образцов стекла КНФС-3.

Для проверки оптимальности выбранных условий травления были выполнены серии тестовых обработок образцов № 1 и № 5 в растворе плавиковой кислоты и гидроксида натрия. Результаты представлены на рисунке 8, где представлены фотографии поверхностей образцов стекла КНФС-3 с проявленными треками.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Фотографии поверхности образцов КНФС-3 после травления: а) в плавиковой кислоте б) в гидроксиде натрия. Изображения получены на микроскопе комплекса ПАВИКОМ с объективом 20[×].

На каждом этапе тестирования процесса травления облучённых стекол выполнялась съёмка протравленных треков, а также производились измерения геометрических параметров и массы образцов стекла, размеры треков (глубину и диаметр трека). Полученные результаты измерений зависимостей толщины стравленного слоя, массы образцов и геометрических размеров треков представлены на рисунке 3.9. Измерение массы образцов до и после травления проводилось на высокоточных аналитических весах модели AND HG-100AZG в лаборатории ЛЭЧ ФИАН. Для более точных измерений с 8-кратным увеличением геометрических размеров образцов до и после травления использовался микроскоп измерительного комплекса ПАВИКОМ.

Таким образом, по итогам выполненных измерений были определены геометрические параметры лунок треков ионов $^{132}\text{Xe}^{26+}$, протравленных в различных химических растворах при разных временных интервалах травления.

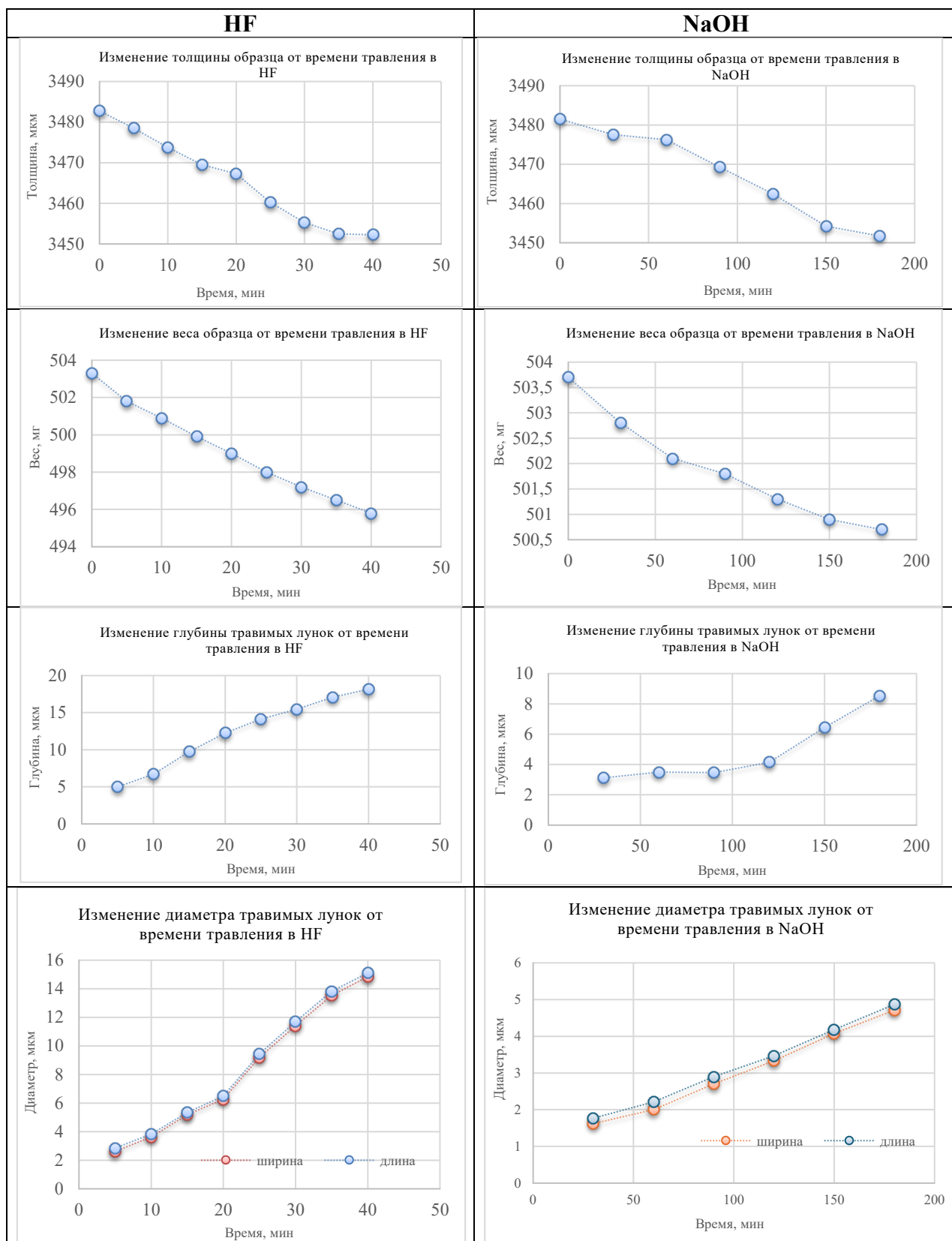


Рисунок 3.9 – Данные измерений геометрии и веса образцов стекла и размеров протравленных треков на всех этапах калибровочного травления.

По результатам серии травлений для дальнейших работ была выбрана плавиковая кислота HF. Этот выбор был обусловлен существенно меньшим необходимым временем травления, более высокой стабильностью раствора, изображения треков ионов,

протравленных в плавиковой кислоте, характеризуются повышенной контрастностью по сравнению с результатами травления в гидроксиде натрия, что способствует повышению точности измерений.

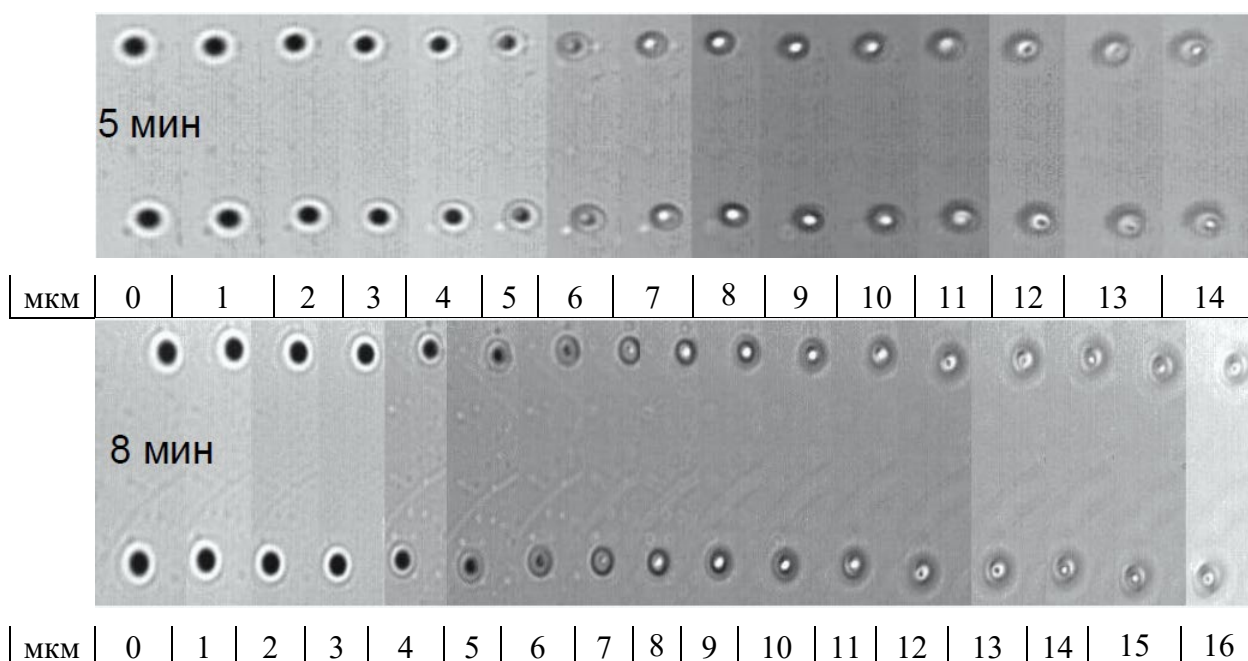
3.7 Исследование характеристик протравленных треков различных ионов

По результатам методических работ со стеклами ГЛС-22 и КНФС-3 (тестовые облучения ионами ксенона, создание методики определения толщины стравленного слоя, выбор травящего вещества, разработка алгоритма измерения геометрических параметров треков ионов) была выполнена серия облучений образцов стекла КНФС-3 различными ионами. Всего было облучено 71 образцов стекла, из которых 31 образец был облучен ионами ксенона (Xe), 20 – ионами аргона (Ar) и 20 – ионами криптона (Kr). Целью исследования являлась оценка возможности идентификации ионов по характеристикам их треков, протравленных в стекле.

Травление проводилось с использованием плавиковой кислоты различной концентрации, варьировавшейся от 3% до 40%.

Производились измерения глубины треков и размеров лунок на поверхности (при вертикальном падении частиц – диаметры, при наклонном падении – длины осей эллипсов). На рисунке 3.10 представлена форма лунок треков ксенона в зависимости от продолжительности травления в 40%-ной плавиковой кислоте.

а) Вертикальное падение, энергия ионов Xe $E=65-68$ МэВ.



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

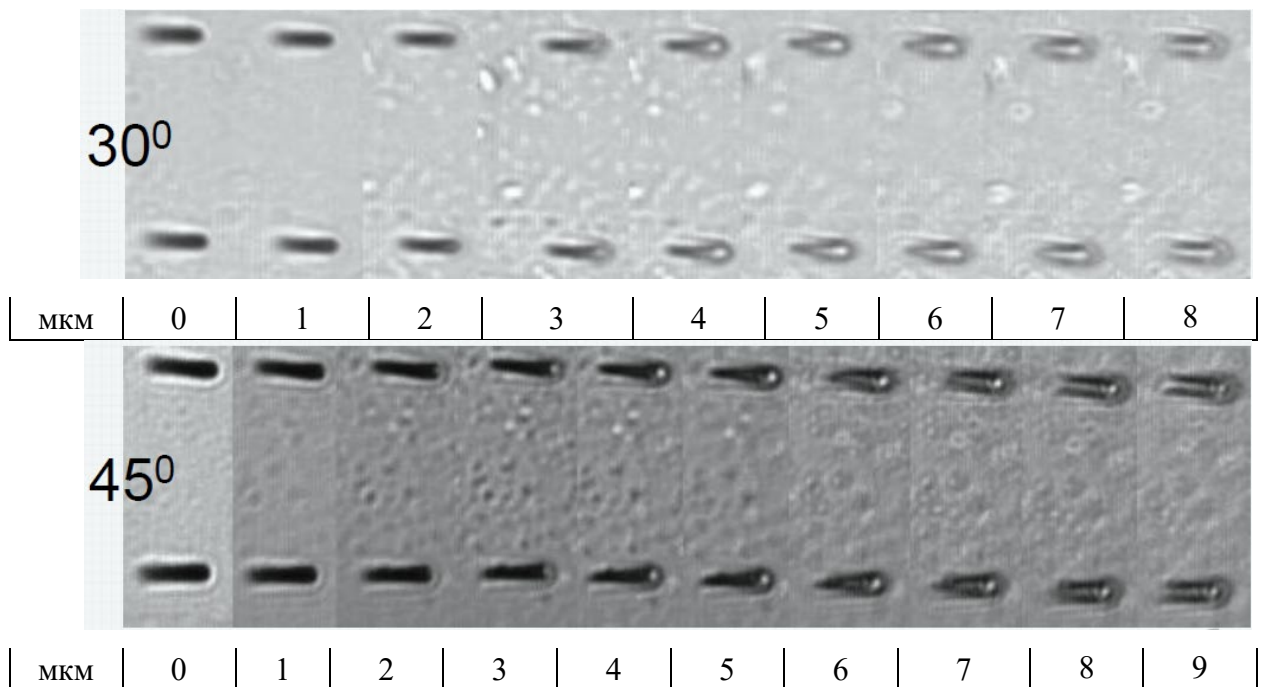


Рисунок 3.10 – Форма лунок треков Хе с разными энергиями и углами падения, образовавшихся в результате травления в 40HF для разных времен травления.

Глубину треков определяли визуально под микроскопом по специфическим особенностям пятна. Критерий окончания трека, основанный на появлении чётко выраженной белой или чёрной точки на изображении трека под микроскопом, можно рассматривать как условный, поскольку такой контраст может возникать из-за края лунки на поверхности образца, что затрудняет визуализацию конечной точки трека на фоне этого интенсивного контраста.

На рисунке 3.11(а) представлены зависимости глубины треков ионов ксенона с различными энергиями при вертикальном падении от времени травления в 40%-ной плавиковой кислоте. Эти зависимости хорошо аппроксимируются линейной функцией. На рисунке 3.11(б) показаны аналогичные зависимости для различных углов наклона к нормали для треков ионов с энергией 160 МэВ.

Анализ экспериментально полученных зависимостей глубины треков ионов ксенона для различных энергий и углов падения показывает, что данный параметр не позволяет однозначно определять характеристики иона.

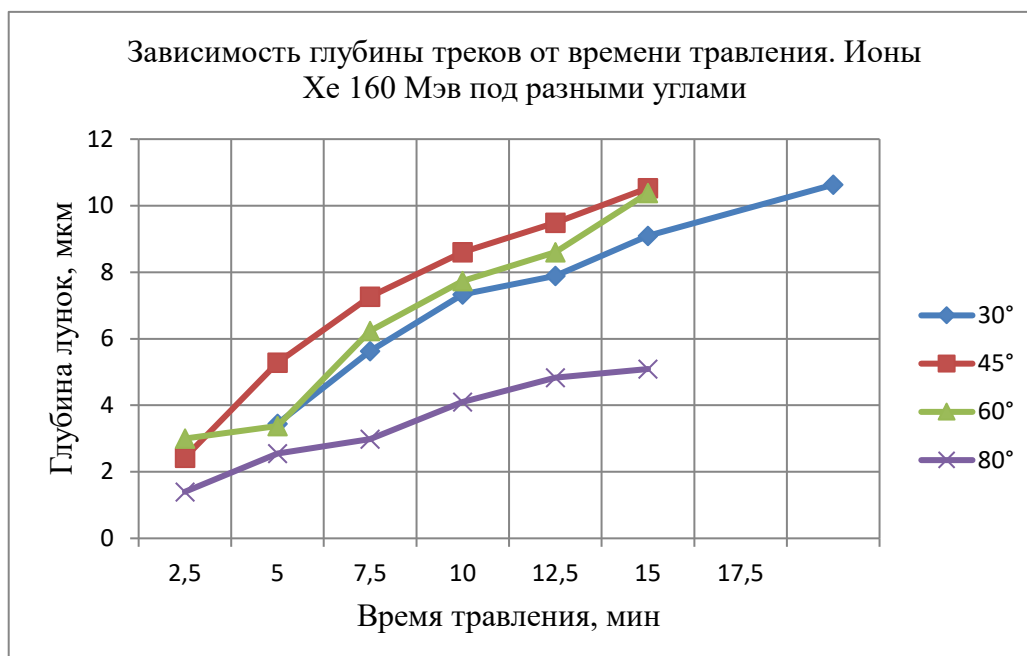
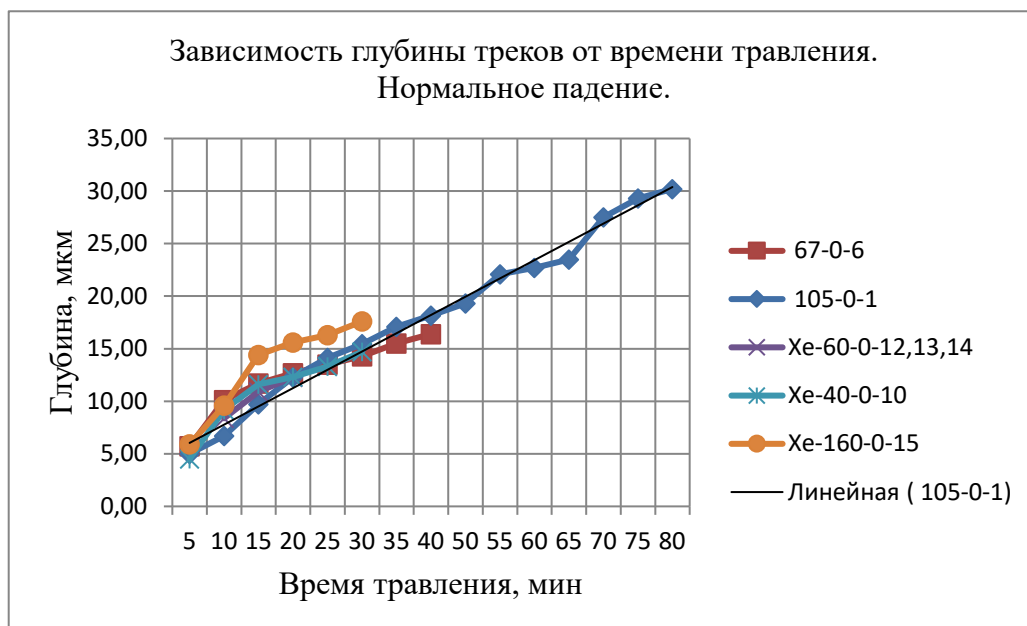


Рисунок 3.11 – а) Зависимости глубины треков ионов Хе различных энергий при вертикальном падении от времени травления в 40НФ. б) Зависимости глубины треков ионов Хе с энергией 160 МэВ и разными углами к нормали от времени травления в 40НФ.

На рисунке 3.12 представлена зависимость глубины треков различных ионов от времени травления. Здесь представлены результаты измерений глубины треков для ионов аргона (44 МэВ), криптона (92 МэВ) и ксенона (40 МэВ) при нормальном падении. Полученные данные не выявляют существенных различий между этими ионами в условиях травления в 40%-ной плавиковой кислоте.

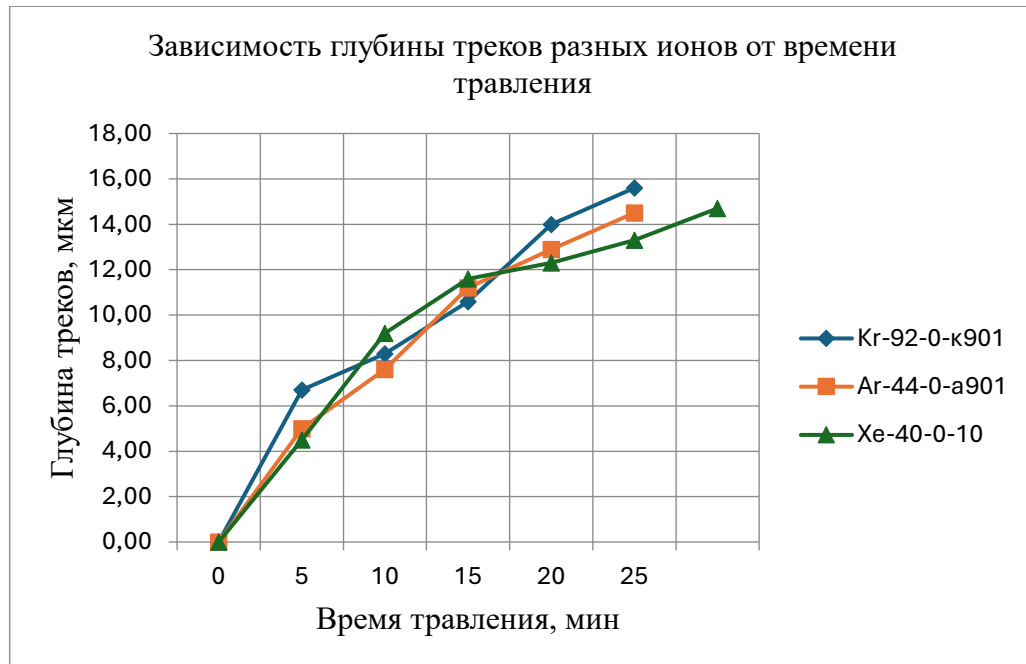


Рисунок 3.12 – Зависимость глубины треков разных ионов от времени травления.

На первоначальной стадии обработки облученных фосфатных стекол травление образцов производилось с использованием концентрированной плавиковой кислоты 40HF. Для травления применяли фторводородистую кислоту HF производства ООО «Сигма Тек», соответствующую требованиям ГОСТ 10484-78 (40HF). Спектрометрический анализ показал массовую долю HF равную 45,52%. На рисунке 3.13 представлены диаметры лунок, оставленные различными ядрами при нормальном падении пучка, полученные в результате травления в 40HF. Данные были собраны для ионов аргона с энергией 44 МэВ, криптона с энергией 92 МэВ и ксенона с энергией 67 МэВ. Наши результаты травления в 40HF, показанные на рисунке 10, не выявили зависимости размеров лунок от заряда ионов, что позволило предположить, что при использовании высококонцентрированного травящего раствора и выбранных интервалах травления мы можем пропустить стадию оптимального проявления треков, обеспечивающую наилучшую разрешающую способность для данного стекла и травителя. При травлении в менее концентрированном растворе HF ожидается более высокая эффективность регистрации, то есть большее значение отношения скоростей травления по треку и по массе детектора V_t/V_m . Это связано с лучшими условиями для конвекции травителя в области трека при медленном травлении по сравнению с быстрым травлением в концентрированных растворах [110]. Исходя из этого, дальнейшие исследования были продолжены с использованием кислоты меньшей концентрации.

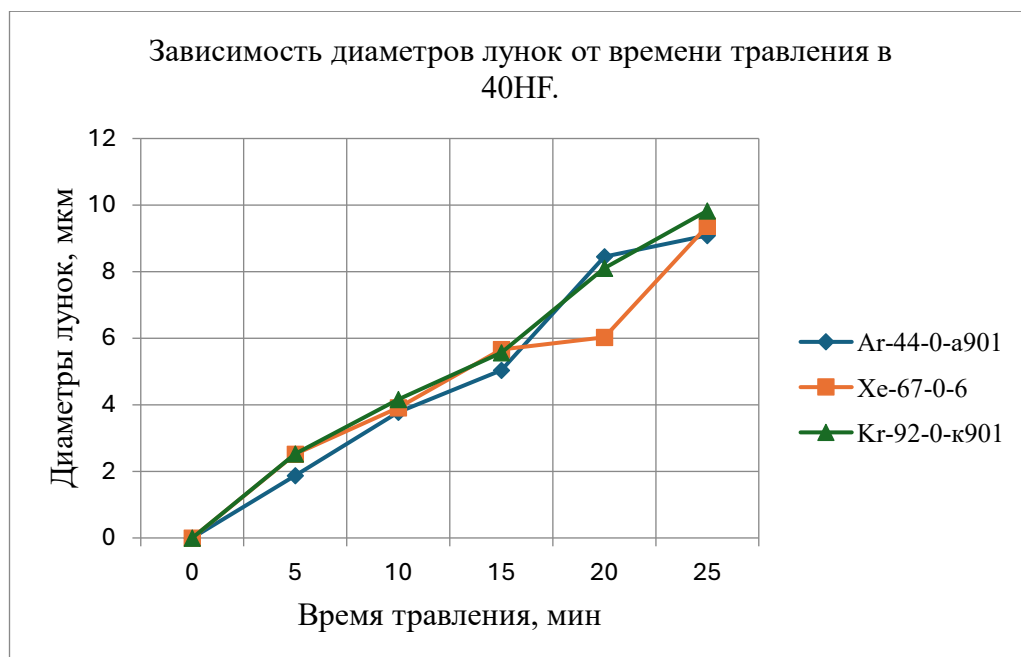


Рисунок 3.13 – Диаметры лунок от различных ядер при нормальном падении пучка.

На начальном этапе травления масса концентрированной кислоты составляла 520 г/л. Однако, учитывая отсутствие данных о зависимости размеров лунок от заряда ионов (рисунок 3.13), возникло предположение, что при высоком содержании травящего раствора и выбранных интервалах травления мы могли упустить этап оптимальной проявленности треков, обеспечивающий максимальное разрешение для данного стекла и травителя.

Последующее травление с концентрацией раствора 40 г/л оказалось недостаточно эффективным для образования видимых треков. В последующих опытах использовался раствор с массовой долей 200 г/л HF, что позволило дифференцировать треки от различных ионов (см. таблицу 5).

Для практической подготовки раствора низкой концентрации использовалась пластиковая емкость объемом 60 мл. В неё помещали 5 мл 40HF и доводили объем до полного добавлением воды, что соответствовало примерно 3% HF.

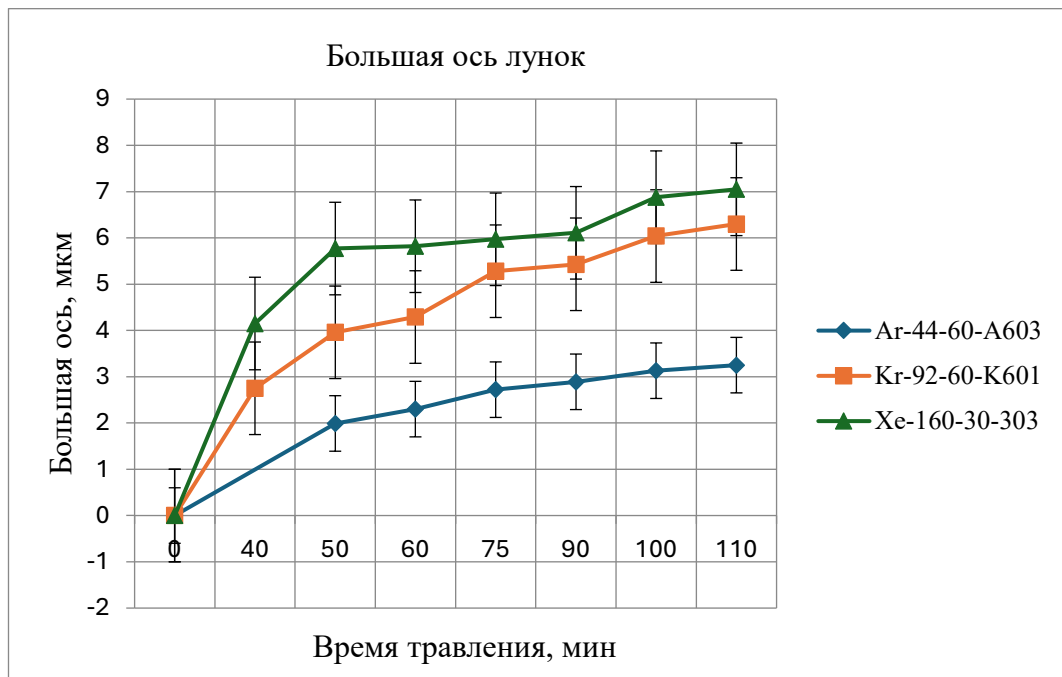
Для приготовления травителя, который впоследствии был выбран для достижения высококачественных результатов, в пластиковый мерный стакан добавляли 35 мл 40HF, а затем довели объем до 100 мл водой, что соответствует приблизительно 20% HF.

Таблица 5 – Размеры осей протравленных лунок от разных ионов с разными энергиями. Указаны углы падения пучка к поверхности образца.

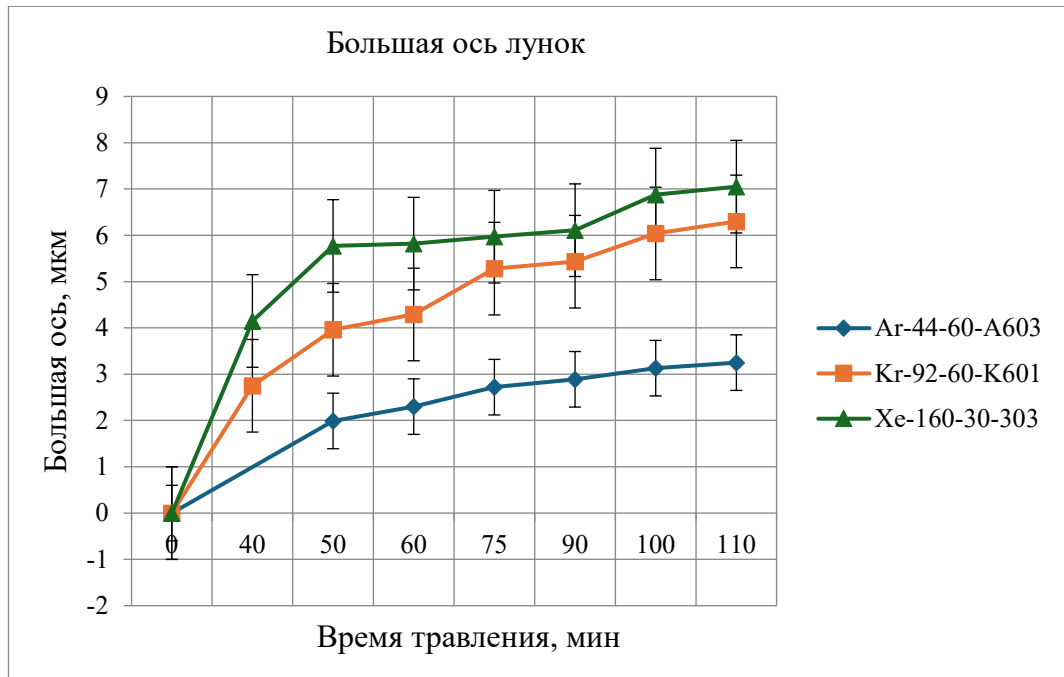
Время травления, мин		Ar (60°, 44 МэВ)	Kr (60°, 92 МэВ)	Xe (30°, 160 МэВ)
40	Большая ось, мкм	-	2,75±0,68	4,15±0,99
	Малая ось, мкм	-	1,37±0,48	2,16±0,82

50	Большая ось, мкм	$1,99 \pm 0,37$	$3,96 \pm 0,89$	$5,77 \pm 1,49$
	Малая ось, мкм	$1,61 \pm 0,33$	$1,96 \pm 0,66$	$2,72 \pm 1,12$
60	Большая ось, мкм	$2,30 \pm 0,61$	$4,29 \pm 0,93$	$5,82 \pm 1,27$
	Малая ось, мкм	$1,72 \pm 0,50$	$2,04 \pm 0,76$	$2,80 \pm 1,21$
75	Большая ось, мкм	$2,72 \pm 0,65$	$5,28 \pm 1,22$	$5,97 \pm 1,56$
	Малая ось, мкм	$1,88 \pm 0,55$	$2,50 \pm 0,93$	$2,93 \pm 0,84$
90	Большая ось, мкм	$2,89 \pm 0,59$	$5,43 \pm 0,99$	$6,11 \pm 1,64$
	Малая ось, мкм	$1,94 \pm 0,46$	$2,53 \pm 0,68$	$3,16 \pm 1,11$
100	Большая ось, мкм	$3,13 \pm 0,48$	$6,04 \pm 0,94$	$6,88 \pm 1,64$
	Малая ось, мкм	$2,04 \pm 0,55$	$2,85 \pm 0,81$	$3,18 \pm 0,88$
110	Большая ось, мкм	$3,25 \pm 0,65$	$6,30 \pm 1,01$	$7,05 \pm 1,72$
	Малая ось, мкм	$2,04 \pm 0,36$	$3,01 \pm 0,82$	$3,64 \pm 1,00$

Данные таблицы 3 представлены в графическом виде на рисунке 3.14.



а)



б)

Рисунок 3.14 – Большая (а) и малая (б) оси протравленных лунок от разных ионов.

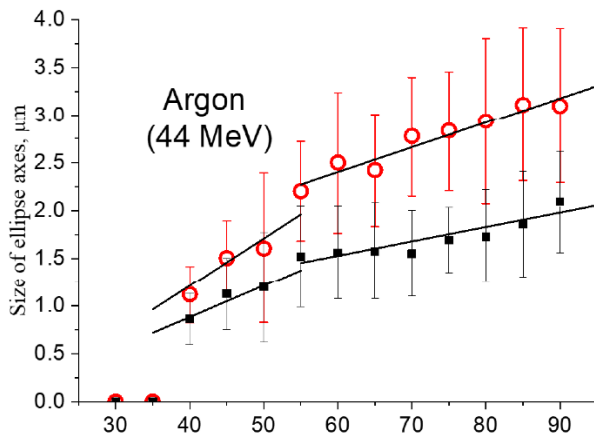
3.8 Параметрическая связь заряда ионов с измеряемыми характеристиками треков

Результаты травления в 20% HF треков ядер разного заряда с углом входа в поверхность стекла 30° представлены на рисунке 3.15. Большие (красные точки) и маленькие (черные точки) оси эллипсов от различных ионов на поверхности стекла приведены в зависимости от продолжительности травления. Данные были получены без нагрева образцов.

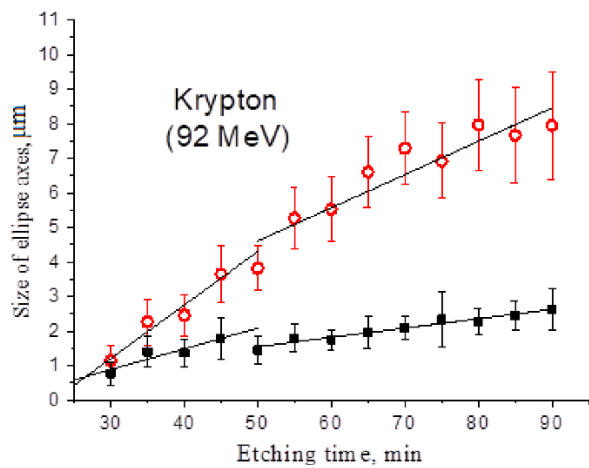
Характер полученной зависимости свидетельствует о том, что процесс травления делится на две стадии. На первой, с более короткими интервалами травления (до “колена”), трек травится до точки остановки ионов. На участке с более длительными интервалами травления (после “колена”) происходит изотропное травление материала без дальнейшего развития трека. Участки на рисунке 3.15 выделены с помощью аппроксимации функции плотности вероятности методом наименьших квадратов. В области второго сегмента скорость травления, определяемая как угловой коэффициент соответствующего сегмента, заметно ниже, чем в первом.

На рисунке 3.16 представлены коэффициенты наклона сегментов (скорости изменения осей эллипса) в зависимости от заряда иона. Сравнение показывает, что при коротких интервалах травления (рисунок 3.16а) эта зависимость более выражена, в то время как с увеличением продолжительности травления чувствительность к заряду снижается

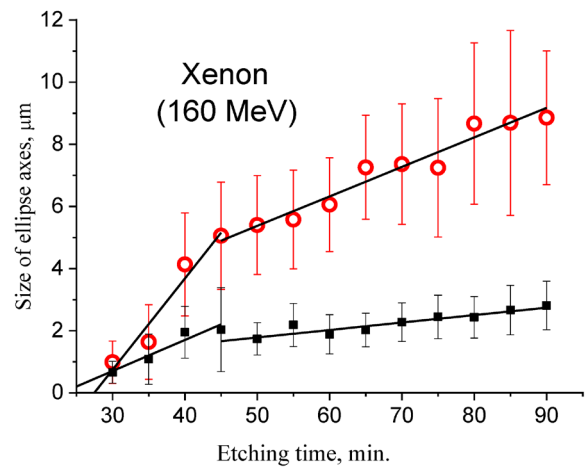
(рисунок 3.166). Из этого следует, что при данных условиях интервалы травления, превышающие 50 мин, менее информативны для определения характеристик ионов



(a)

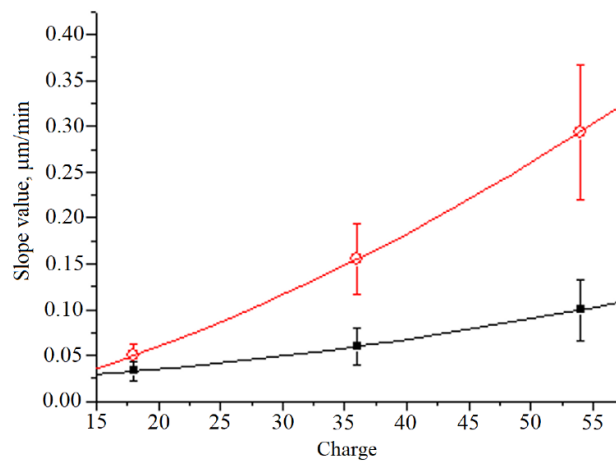


(б)

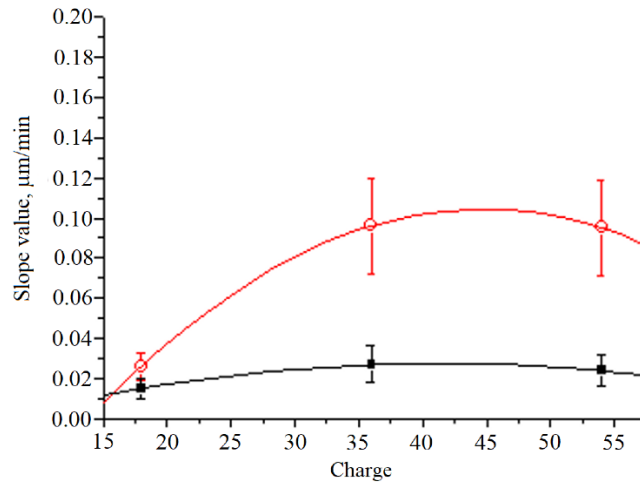


(в)

Рисунок 3.15 – Зависимость большой (красные точки) и малой (черные точки) осей эллипса на поверхности стекла от продолжительности травления для различных ионов ((а) — аргона, (б) — криптона и (в) — ксенона). Угол наклона луча к поверхности стекла (цветного) составляет 30° .



(a)



(б)

Рисунок 3.16 – 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 (цветными).

Представленный анализ зависимости геометрических параметров трека на поверхности стекла от продолжительности травления и скорости этого изменения позволяет разработать алгоритм идентификации ионов 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. Заряд иона может быть оценен на основе зависимостей, аналогичных полученным в наших калибровочных экспериментах (рисунок 3.16), путем интерполяции обратной функции. Травление с небольшими интервалами и мониторинг характеристик протравленных треков повышают надежность идентификации ионов.

Зависимость коэффициентов наклона сегментов от заряда иона, показанная на рисунке 3.16, 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 3.17 стрелками показан определение заряда ядра при значении наклона 20 микрон

в минуту дающего оценку $Z = 45$. 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 $Z = 33$ и $Z = 39$. Таким образом, наклон в 20 микрон в минуту соответствует заряду $Z = 45 \pm 3$. Данный алгоритм позволяет оценить точность определения заряда ионов по предлагаемому методу.

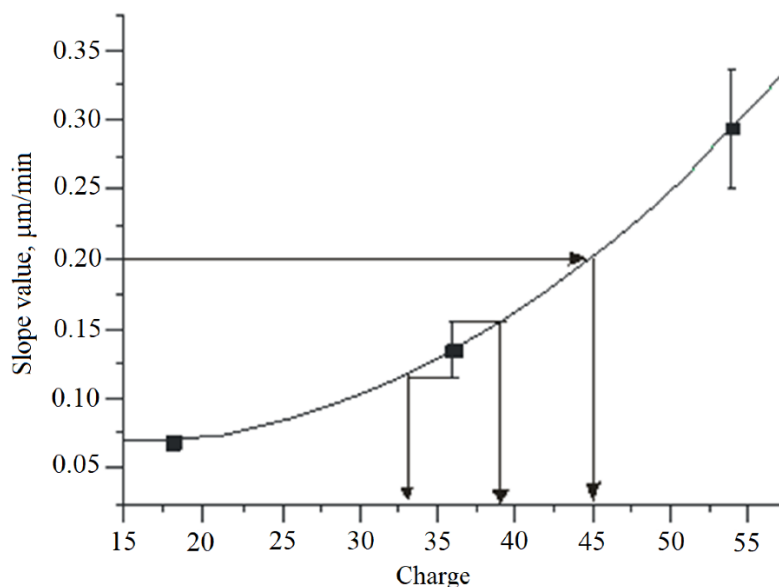


Рисунок 3.17 – Алгоритм определения заряда ионов (без цвета).

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.

Таким образом, в рамках изучения возможности идентификации ускоренных многозарядных ионов в фосфатном стекле была проведена серия тестовых и калибровочных экспериментов с использованием резонансного циклического ускорителя ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ. По результатам этой работы были определены оптимальные режимы облучения, травления и обработки данных, позволившие построить алгоритм определения заряда иона по геометрическим параметрам его трека травления.

В дальнейших исследованиях предполагается изучить зависимость параметров треков травления от энергии ионов, что позволило бы расширить диапазон возможностей детекторов из фосфатного стекла для регистрации продуктов спонтанного деления сверхтяжёлых ядер, полученных в результате ядерного синтеза.

Глава 4. Изучение скрытой внутренней структуры зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря методом мюонографии

4.1 Метод мюонографии

Метод мюонографии, активно развивающийся в последние годы, представляет собой перспективный подход к исследованию внутренней структуры массивных промышленных и природных объектов. Данный метод базируется на анализе изменения интенсивности потока атмосферных мюонов после прохождения ими исследуемого объекта [111–114].

Применение атмосферных мюонов в качестве зондирующего излучения для исследования крупных, вплоть до километровых размеров, объектов, обусловлено уникальными физическими характеристиками данных частиц. Мюоны не являются ядерноактивными частицами и теряют свою энергию в электромагнитных взаимодействиях, в основном на тормозное излучение и ионизацию атомов. Ионизационные потери мюонов зависят от их энергии, но для релятивистских частиц с энергиями до ~ 100 ГэВ могут считаться величиной постоянной (порядка 2 МэВ/г см^{-2}). Для мюонов с такими энергиями ионизация является доминирующим механизмом энергетических потерь, в то время как для высокоэнергичных мюонов с энергиями $E_\mu \sim 1$ ТэВ и выше потерями энергии на ионизацию мюонов можно пренебречь. При энергиях $E_\mu > 100$ ГэВ определяющий вклад вносит радиационное (тормозное) излучение [115]. Известно, что потери энергии на тормозное излучение обратно пропорциональны квадрату массы частицы. Поскольку масса покоя мюона приблизительно в 200 раз превышает массу покоя электрона ($m_\mu/m_e \approx 206,768$), энергия, излучаемая при торможении мюона в поле ядра, меньше энергии, излучаемой электроном в том же поле, примерно в $4,3 \times 10^4$ раз. С относительно малыми потерями энергии мюонов на тормозное излучение связаны значительно большие, по сравнению с электронами, пробеги мюонов в веществе. Эти факторы – отсутствие сильных взаимодействий, большая масса покоя и скорость, близкая к скорости света, – обуславливают высокую проникающую способность мюонов как по сравнению с адронами, так и по сравнению с электронами и γ -квантами.

Мюоны образуются в верхних слоях земной атмосферы в результате взаимодействий первичных космических лучей [116]. Будучи нестабильными частицами со средним временем жизни $2,197 \times 10^{-6}$ с, мюоны с энергиями порядка сотен тераэлектронвольт благодаря эффекту релятивистского замедления времени способны

преодолевать значительные расстояния до своего распада [117]. Распадный путь мюона с энергией ≥ 1 ГэВ сравним с толщиной остаточной атмосферы от уровня генерации мюонов до поверхности Земли, составляющей в среднем от 10 до 20 км, и увеличивается с ростом энергии. Большой пробег мюонов до поглощения в веществе скальных пород, сравнимый по величине с масштабом исследуемых объектов и даже превосходящий его, делает их уникальным агентом для мюонографии: поскольку спектр космических мюонов простирается до сотен ТэВ и выше, даже для таких протяженных объектов, как горные массивы, существуют мюоны, способные пройти их насквозь.

Потоки мюонов вблизи земной поверхности обладают достаточно интенсивны (приблизительно одна частица на квадратный сантиметр за одну минуту при энергии $E_{\mu} > 1$ ГэВ) и составляют около 80% от общего числа частиц космического происхождения на данном уровне наблюдений [118].

При прохождении атмосферных мюонов сквозь объекты на поверхности Земли происходит ослабление их потока, которое пропорционально плотности материала объекта. Изменение степени поглощения мюонов в зависимости от направления их движения связано с различием в плотности среды, встречающейся на их пути. Этот принцип лежит в основе метода мюонографии. Частицы, прошедшие через объект, регистрируются специальными детекторами (например, трековыми детекторами из слоев ядерной эмульсии). Путем анализа вариаций угловых распределений потоков мюонов можно неинвазивным способом выявить скрытую внутреннюю структуру объекта с различными значениями плотности. То есть исследование углового распределения мюонов после их прохождения через объект дает возможность оценить способность объекта поглощать мюоны в различных направлениях и таким образом обнаружить структурные неоднородности.

Первое предложение об использовании космического излучения для решения задач геологоразведки (изучение запасов свинцовых руд Садонского месторождения) было высказано академиком АН СССР Петром Петровичем Лазаревым [119] еще в 1926 году на заседании Секции физико-математических наук общего собрания Академии. Однако мюон – наиболее подходящая частица для таких исследований – был открыт только в 1936 году. Поэтому идеи П.П.Лазарева были впервые частично реализованы спустя почти тридцать лет, в 1955 году, в Австралии для измерения ослабления вертикального потока космических мюонов с целью оценки толщины пород над горной выработкой [120]. В последующие годы мюонография использовалась для изучения геофизических структур на Земле [121–125] и Марсе [126], археологических [127–129] и промышленных объектов [130], включая объекты ядерной энергетики [131], в разведке полезных ископаемых [132–134]. Особое

внимание заслуживают проекты по мониторингу состояния активной зоны реакторной установки на АЭС Фукусима-1 в Японии, пострадавшей от цунами в 2011 году [135–138], в частности, с применением технологий на основе ядерных эмульсий.

Для регистрации частиц в экспериментах по мюнографии используются различные типы трековых детекторов элементарных частиц, включая электронные [130, 134, 139, 140] и эмульсионные [125, 128, 141–145]. Новая эра в активном развитии мюнографии последние двадцать лет во многом связана с появившейся возможностью использования ядерноэмульсионных детекторов большой площади благодаря созданию высокотехнологичных автоматизированных сканирующих оптических микроскопов. Фотографическая ядерная эмульсия представляет собой суспензию, содержащую светочувствительные микрокристаллы галогенидов серебра, равномерно распределённые в желатине [146]. Эмульсия наносится с обеих сторон тонкой пластиковой основы толщиной порядка нескольких сотен микрометров (двухсторонняя ядерная эмульсия). Среди ключевых преимуществ трековых детекторов на основе ядерной эмульсии важнейшим является самое высокое пространственное разрешение (<1 мкм), позволяющее «разглядеть» объект размером 15 метров на расстоянии 1 километр. Кроме того, эмульсионные детекторы имеют небольшие размеры и простую конструкцию, большую информационную ёмкость, удобство эксплуатации, заключающееся в отсутствии необходимости организации дежурства операторов, использования источников электропитания и электронной системы считывания данных во время экспонирования.

4.2 Описание эксперимента

Нашей научной группой в сотрудничестве с НИТУ МИСИС, МИФИ и НИИЯФ МГУ в России проводятся эксперименты на основе метода мюнографии как инструмента для исследования вариаций плотности внутри крупных природных и промышленных объектов. Работы, проведённые нами, начиная с 2012 г, продемонстрировали практическую применимость мюнографии на основе эмульсионных детекторов и возможность получения уникальных научных результатов. Экспериментальный опыт позволил разработать и усовершенствовать методы проведения исследований, обработки и анализа данных, определить факторы, влияющие на статические и динамические эффекты и создать алгоритм визуализации внутренней структуры изучаемых объектов.

В частности, нами была проведена серия экспериментов по исследованию памятников культурного наследия России методом мюнографии.

Масштабный эксперимент был выполнен в 2020 г на территории Свято-Троицкого Данилова монастыря в г. Переславле-Залесском (Ярославская область), историко-архитектурного объекта федерального значения [147]. Метод мюнографии был применён в качестве альтернативного метода исследований в границах исторического памятника и действующего монастыря, где традиционные археологические исследования с проведением раскопок невозможны. Обследовались постройки монастыря и территория между ними, где предположительно могут находиться древние подземные захоронения и фрагменты фундаментов утраченных сооружений; 21 эмульсионный детектор был установлен в подвальных помещениях сохранившихся зданий (десять на первом этапе эксперимента - с ноября 2020 года по февраль 2021 года, и одиннадцать – на втором этапе: три детектора с декабря 2020 года по апрель 2021 года и восемь детекторов с июня по сентябрь 2021 года).

Предметом изучения в данном эксперименте стали здания Церкви Похвалы Божьей Матери и Церкви Всех Святых, а также территория между ними (рисунке 4.1).



Рисунок 4.1 – Территория Свято-Троицкого Данилова монастыря. Цифрами на красном фоне обозначены области исследований: 1 – подвалы здания Церкви Похвалы Божьей Матери и прилегающая территория; 2 – возможные остатки старого фундамента здания Церкви Всех Святых; 3 – участок территории между зданиями церквей; 4 - Троицкий собор.

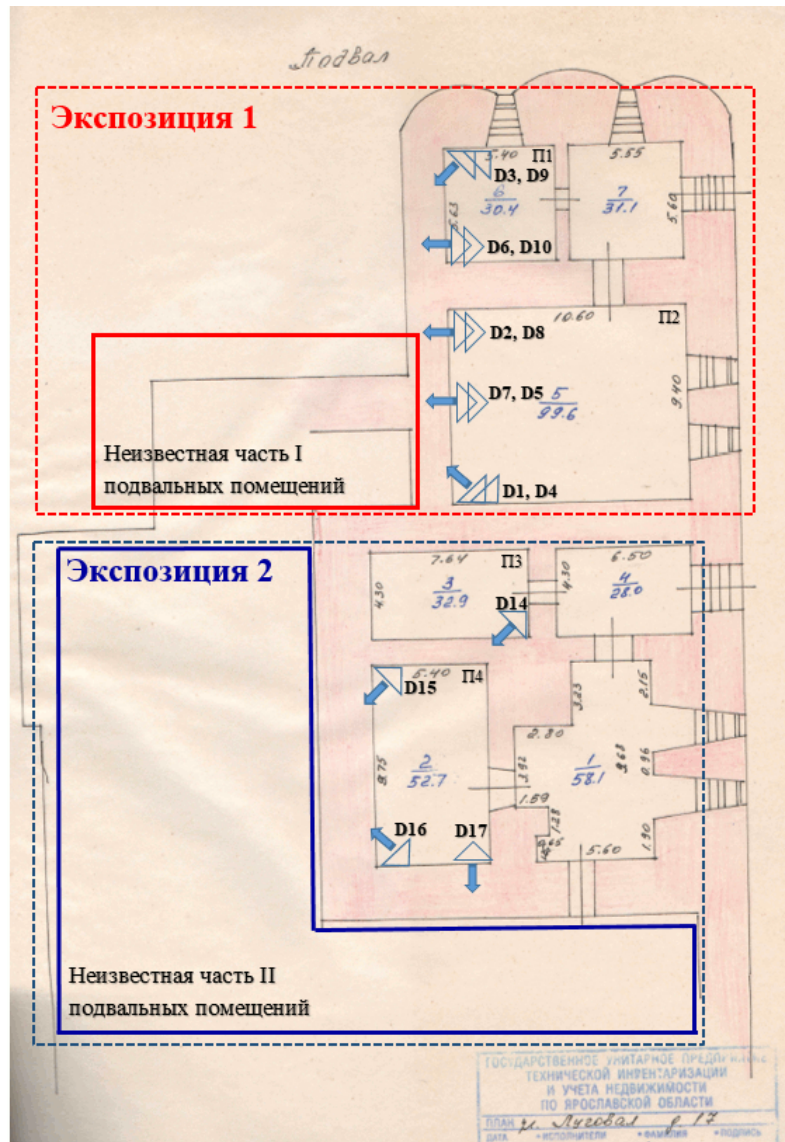
В геоморфологическом аспекте Свято-Троицкий Данилов мужской монастырь города Переславля-Залесского располагается на слаборасчленённой зандровой равнине Верхне-Волжской низменности. Территория характеризуется застройкой, а её поверхность покрыта дерном.

Климат исследуемого района умеренноконтинентального типа, с умеренно тёплым и влажным летом и умеренно суровой зимой. Среднегодовая многолетняя температура

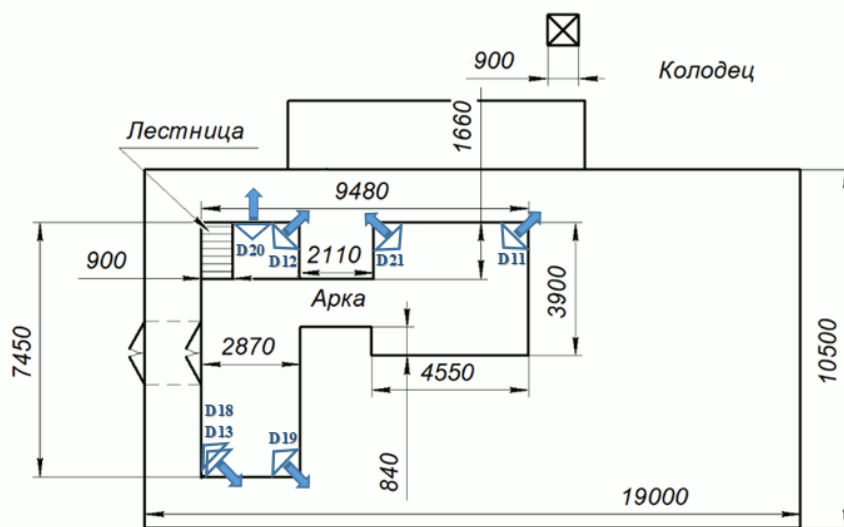
воздуха составляет $+3,2^{\circ}\text{C}$, среднемесячная зимняя температура (в январе) достигает $-11,9^{\circ}\text{C}$, летняя (в июле) $+17,6^{\circ}\text{C}$. Годовая амплитуда температур значительна, варьируя между абсолютными экстремумами $+36^{\circ}\text{C}$ и -46°C . В течение пяти месяцев года (января, февраля, марта, ноября и декабря) среднемесячные температуры находятся ниже нуля градусов Цельсия. Температурный режим имеет значение для работы с ядерными фотоэмульсиями. Атмосферные осадки превышают уровень испарений, вследствие чего коэффициент увлажнения колеблется в пределах 1,2–1,3. Это указывает на то, что территория относится к зонам достаточного и периодически избыточного увлажнения, способствующего активизации процессов заболачивания. Наиболее выражено это явление в низинах, где наблюдается повышенное количество атмосферных осадков. Средняя толщина снежного покрова варьируется от 30 до 70 см, при этом наибольшие скопления снега наблюдаются в пониженных участках рельефа, что приводит к значительным весенним половодьям. Ледостав на реках начинается во второй половине ноября, а их вскрытие происходит в первой половине апреля.

Таким образом, первым инженерно-геологическим элементом, залегающим под почвенно-растительным слоем на участке расположения Свято-Троицкого Данилова мужского монастыря, можно принять суглинки туго-, мягкопластичные с плотностью (1,8–1,85) г/см³. Этот состав грунтов был учтен при проведении моделирования экспозиции детекторов.

На рисунке 4.2 представлены планы подвалов Церкви Похвалы Божией Матери (ЦПБМ) (рисунок 4.2а) и Церкви Всех Святых (ЦВС) (рисунок 4.2б) с размещением детекторов на двух этапах экспозиции. Глубина обоих подвалов составляет приблизительно 3 метра. На плане Бюро технической инвентаризации отображён подвал ЦПБМ, где схематически отмечены заложенные, скрытые участки помещений со сложной конфигурацией. Расположение детекторов было выбрано так, чтобы обеспечить визуализацию этих скрытых частей подвала, исключив при этом влияние «теневого эффекта», создаваемого Троицким собором, находящимся вблизи ЦПБМ (позиция 4 на рисунке 4.1). Детекторы, установленные в ЦВС, предназначались для поиска остатков древнего фундамента и исследования зоны между церковными постройками (позиция 3 на рисунке 4.1), где потенциально могли располагаться старинные захоронения.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Схемы установки детекторов: а) – экспозиции в подвальных помещениях ЦПБМ (П1-П4); б) – экспозиции в подвальных помещениях ЦВС.

В ходе эксперимента было экспонировано и обработано суммарно примерно 3 м² ядерной эмульсии, изготовленной на российском предприятии ООО «АВК Славич». (Утерянная в 1990-х годах в России высокотехнологичная методика производства ядерной эмульсии была успешно восстановлена благодаря совместной работе нашей группы и специалистов ООО «АВК Славич»). Детекторы представляли собой стопки эмульсионных плёнок (по 6 в стопке), упакованные в светонепроницаемые пакеты и жестко зафиксированные в вертикальном положении посредством специальной металлической конструкции (рисунок 4.3). Дополнительно, для контроля потока зарегистрированных частиц, на фронтальной стороне детекторов во время первой экспозиции были размещены пакеты с двумя вспомогательными эмульсионными плёнками меньшей площади.

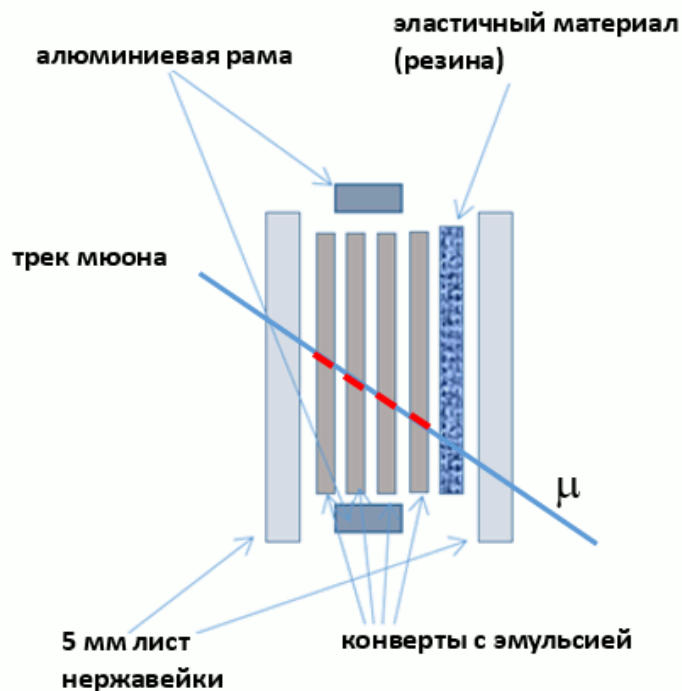


Рисунок 4.3 – Схема эмульсионного детектора.

В данном эксперименте была использована двухсторонняя ядерная фотоэмульсия, с толщиной верхнего и нижнего эмульсионного слоя 50 мкм соответственно, нанесённых на пластиковую подложку толщиной 175 мкм. Размеры эмульсионных слоёв у различных детекторов отличались: в первой экспозиции использовались пластины размером 20×25 см, тогда как во второй – 10×12,5 см. Увеличение площади эмульсионного слоя в первой фазе эксперимента было обусловлено тем, что детекторы располагались на одной высоте с исследуемыми подвалами, регистрируя мюоны, приходящие под небольшими углами к горизонту. Поскольку интенсивность потока таких мюонов существенно меньше, чем у вертикально падающих, для достижения достаточной статистической надёжности результатов было решено применять детекторы большей площадью трекового детектора –

ядерной фотоэмульсии. Однако детальный анализ первой серии экспозиции детекторов показал, что возможно достичь необходимой статистической достоверности данных даже при использовании детекторов с меньшей площадью.

Конструкция детекторов, созданная в НИТУ «МИСИС», обеспечивала надежную фиксацию эмульсионных слоев в вертикальной плоскости. Регулируемые опоры детектора позволяли корректировать его положение относительно уровня с точностью до 0,5 мм/м. Дизайн основания детектора предусматривал однозначную ориентацию устройства в направлениях «вперёд-назад» относительно исследуемой области.

Остроугольное основание детектора на рис.4.4 показывает направление “вперед”, прямоугольная платформа основания с противоположной стороны – направление “назад”. На рисунке 4.4 представлена фотография двух детекторов, установленных по уровню в одном из подвальных помещений ЦПБМ.



Рисунок 4.4 – Детекторы первой экспозиции, установленные в подвале ЦПБМ. Положение детекторов контролировалось по уровню.

Продолжительность облучения первой группы детекторов была установлена на основании моделирования и составила диапазон от 1,5 до 4 месяцев. В ходе эксперимента осуществлялся контроль количества зарегистрированных мюонов с использованием дополнительных тестовых эмульсионных слоев, запечатанных в светонепроницаемый материал и расположенных для удобства на лицевой стороне детекторов. Данные тестовые

слои вынимались с периодичностью 1 месяц, что позволило оценить загрузку основных эмульсионных детекторов с учетом их расположения. Исходя из полученных данных была определена оптимальная продолжительность экспонирования, которая составила три месяца.

4.3 Моделирование эксперимента

Метод мюонографии основан на тех же фундаментальных принципах, что и рентгенография, однако вместо рентгеновского излучения используется естественное космическое излучение, а регистрация осуществляется трековыми детекторами.

Одним из ключевых этапов эксперимента, проводимого методом мюонографии, является моделирование распределения потоков мюонов в изучаемом пространстве и анализ отклика детектора на эти потоки.

Для описания процесса прохождения мюонов через сложные объекты применяется алгоритм, представленный в работах [148, 149], согласно которому создается пространственная модель объекта с указанием местоположения детектора и связанной с ним системы координат. От начальной точки проводятся условные лучи, пересекающие объект и моделирующие траекторию движения мюонов, направление которых определяется азимутальным углом Φ и зенитным углом Θ . Далее вычисляются точки пересечения этих лучей с границами отдельных компонентов объекта, и рассчитываются длины путей мюонов внутри каждого компонента с учетом характеристик материалов, составляющих эти компоненты. Первоначальный поток мюонов уменьшается по мере прохождения через слои материала из-за поглощения менее энергичных частиц. Учитывая путь мюона в материале и его энергетический спектр, можно оценить степень уменьшения потока. Поток, прошедший через первый слой, дополнительно ослабляется при прохождении последующих слоев и так далее. Этот процесс продолжается до выхода мюонного пучка из объекта, позволяя рассчитать итоговый поток мюонов, который будет зарегистрирован детектором. В процессе моделирования учитываются следующие параметры: форма энергетического спектра вертикального потока мюонов из работы [150], зависимость интенсивности мюонного потока от зенитного угла Θ , представленная в форме $F(\Theta)=\cos^2(\Theta)$, и ионизирующая способность мюонов в различных материалах, взятая из источника [151]. Предполагается, что начальный поток не зависит от азимута, то есть $F(\Phi)=\text{const}$.

В расчётах сектор обзора детектора был принят равным 90° по обоим углам, причём зенитный угол изменялся в диапазоне $0 < \Theta < 90^\circ$. Этот диапазон был разбит на 30 интервалов,

что соответствует $\Delta\Phi=\Delta\Theta=3^\circ$ и 900 направлениям траекторий мюонов. Мюоны, падающие на объект, теряют энергию по-разному, в зависимости от направления (Φ , Θ), и вследствие этого в различной степени ослабевает мюонный поток. Именно по зависимости ослабления потока от направления можно судить о распределении материала внутри объекта. В итоге результатом моделирования, также как и результатом эксперимента, является число мюонов, зарегистрированных детектором в элементе телесного угла ($\Delta\Phi$, $\Delta\Theta$) в определённом направлении (Φ , Θ).

Моделирование проводилось для всех задействованных в эксперименте детекторов с учётом их расположения на объекте. В качестве примера можно привести результат моделирования для детектора, установленного в подвальном помещении ЦПБМ (детектор б), для случая, когда в его секторе обзора находилась гипотетическая скрытая подземная комната. На рис. 4.5 даны горизонтальная и вертикальная проекции схемы модельного эксперимента для детектора б.

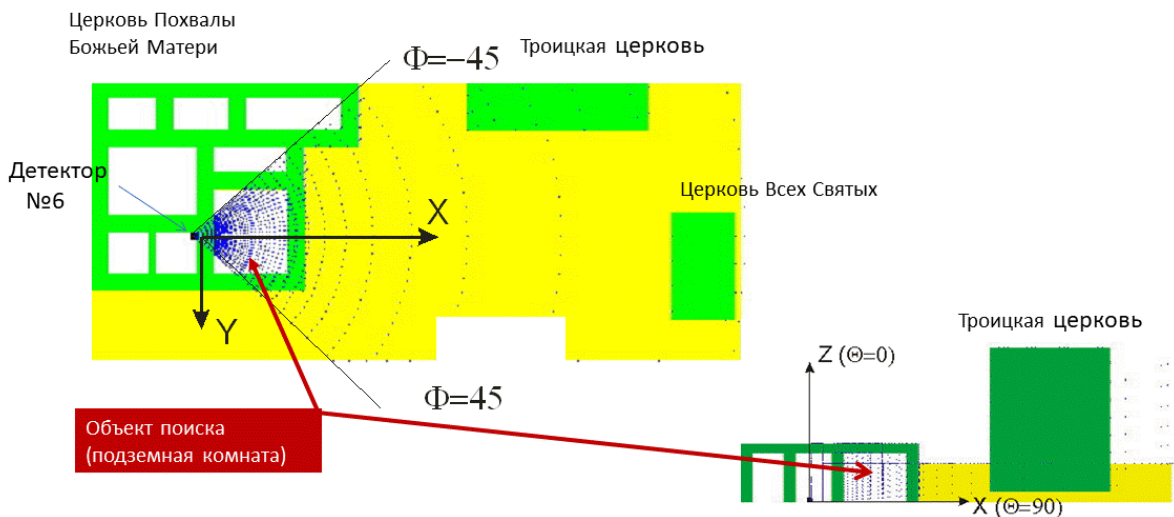


Рисунок 4.5 – Схема модельного эксперимента для детектора б (указаны направления $\Phi=\pm 45^\circ$), установленного в подвале ЦПБМ. Справа от детектора под землей была добавлена скрытая комната, существование которой предполагалось на начальном этапе работ (отмечена стрелкой).

На рисунке 4.6 показаны результаты моделирования в зависимости от угла Φ при фиксированном угле $\Theta=45^\circ$ в относительных единицах. Реальное число частиц пропорционально относительным единицам и зависит от времени облучения. Моделировались потоки мюонов при наличии подземной комнаты (чёрные точки) и без неё (красные точки). Сравнение результатов для этих случаев, помимо почти трёхкратной разницы по абсолютной величине, позволяет увидеть «тени» от близлежащих строений в виде заметных провалов на графике.

Полученное впоследствии экспериментальное распределение потоков мюонов по данным детектора 6 подтвердило отсутствие подземной комнаты в этом секторе.

Эти и аналогичные им модельные расчеты были использованы при анализе данных мюонографических детекторов в реальном эксперименте.

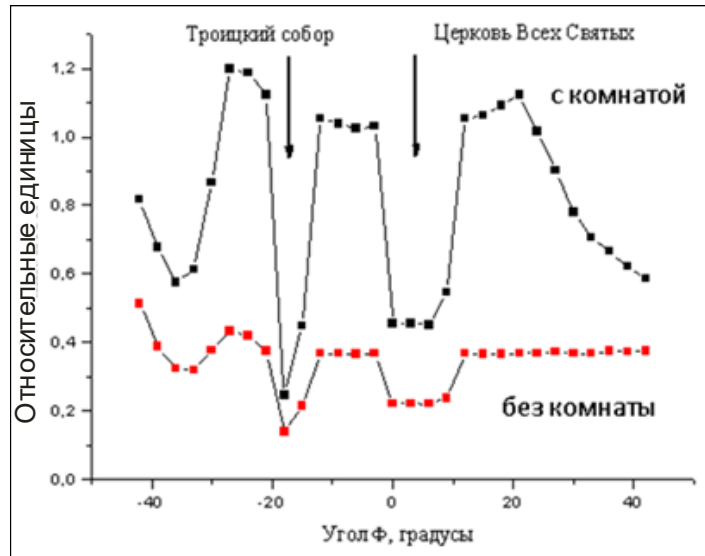


Рисунок 4.6 – Ожидаемое распределение потоков мюонов в детекторе 6 при наличии (чёрные точки) и при отсутствии (красные точки) подземной комнаты, полученное для фиксированного угла $\Theta=45^\circ$.

4.4 Сканирование ядерной эмульсии, реконструкция треков, интерпретация данных

По окончании экспозиции проявленные эмульсии были отсканированы на микроскопах измерительного комплекса ПАВИКОМ [152]. В режиме online производилась реконструкция треков мюонов в верхнем и нижнем эмульсионных слоях двухсторонней эмульсии, так называемых микротреков (микротрек – это фрагмент трека, зарегистрированный в одном эмульсионном слое, МТ). Сканирование производилось в диапазоне углов $\Theta \pm 45^\circ$ относительно нормали к плоскости детектора.

Дальнейшая обработка полученных данных осуществлялась на основе программного пакета FEDRA (Framework for Emulsion Data Reconstruction and Analysis) [153], позволяющего восстанавливать взаимное расположение эмульсионных пластин и зарегистрированных треков в объёме детектора. Реконструкция трека на основе пакета FEDRA включает несколько операций (рисунок 4.7): фиксацию координат зарегистрированных микротреков МТ1 и МТ2, восстановление базового трека БТ на основе двух МТ (базовый трек – это часть трека, пересекающая оба эмульсионных слоя одной пластины), и наконец реконструкцию трека частицы в объёме детектора ОТ (объемный

трек) на основе БТ. Программный алгоритм восстановления трека осуществляет привязку МТ к БТ, координатное совмещение эмульсионных пластин с использованием БТ, идентификацию ОТ и его «выравнивание» с использованием фильтра Кальмана. Более полная информация о работе программы дана в [153].

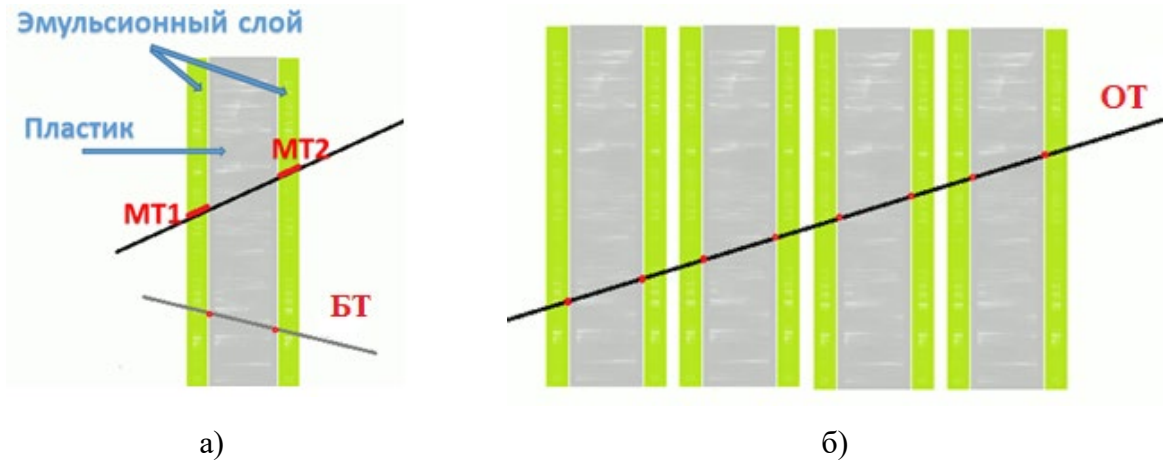


Рисунок 4.7 – Схема реконструкции трека заряженной частицы в эмульсионном детекторе: а) восстановление базового трека БТ в эмульсионной пластине на основе двух микротреков МТ1 и МТ2, зарегистрированных в эмульсионных слоях; б) восстановление трека ОТ в объёме детектора.

Для привязки эмульсионных слоёв и определения координат треков была принята система координат (X_d, Y_d, Z_d) , привязанная к детектору, как показано на рис. 16: оси X_d и Z_d лежат в горизонтальной плоскости, а ось Y_d направлена вертикально вверх. Координаты треков определяются в переменных $tx = \text{tg}(\Theta_d) \cos(\Phi_d)$, $ty = \text{tg}(\Theta_d) \sin(\Phi_d)$, где Θ_d - угол к оси Z_d , а сектор «вперёд» определён как положительное направление оси Z_d . Угол Φ_d отсчитывается от оси X_d в направлении оси Y_d и изменяется в интервале от 0 до 360°. Для представления результатов наиболее удобной и наглядной является система координат, привязанная к поверхности земли (X_3, Y_3, Z_3) (красные оси на рисунок 4.8), которая может быть получена из системы координат детектора поворотом на 90° вокруг оси X_d . Углы Φ_3 и Θ_3 заданы в этой системе аналогично системе детектора. Диапазон углов $\Phi_3 = 0 \div 180^\circ$ соответствует направлению «назад», а $\Phi_3 = 180^\circ \div 360^\circ$ - направлению «вперёд».

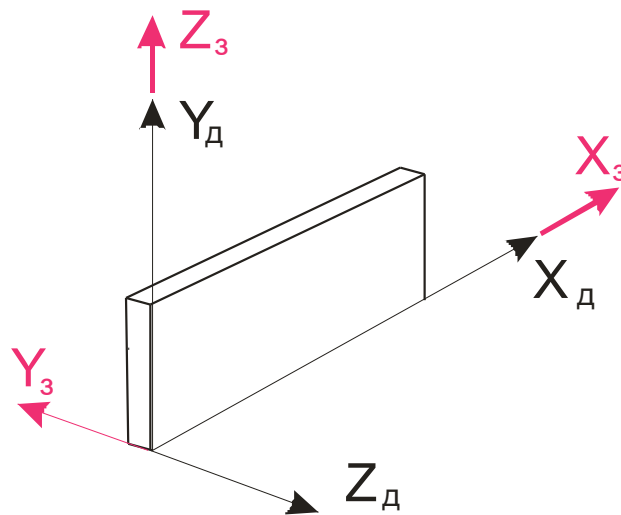
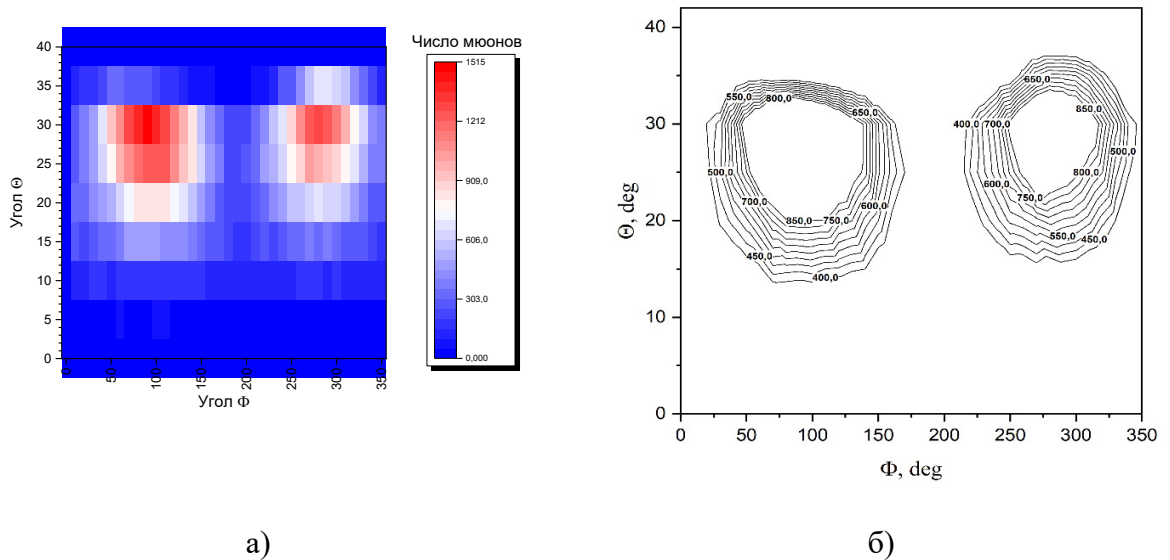


Рисунок 4.8 – Взаимное расположение систем координат, связанных с детектором и с поверхностью земли.

Результатами измерений являются угловые распределения количества мюонов в детекторе. Верхняя полусфера вокруг оси Y_d делится на элементы телесного угла, соответствующие интервалам $\Delta\Phi$ и $\Delta\Theta$ (бины), и для каждого бина производится подсчёт числа зарегистрированных мюонов. Полученное распределение в виде цветной гистограммы демонстрирует различие в степени поглощения мюонов по разным направлениям, а значит и различие в распределении материала в секторе обзора.

На рисунке 4.9а представлена гистограмма в системе детектора, полученная для детектора б с бинами $\Delta\Theta=5^\circ$ и $\Delta\Phi=10^\circ$. Пик в правой части гистограммы соответствует мюонам, приходящим в переднем секторе наблюдения, а пик в левой части гистограммы - мюонам, летящим сзади. Более наглядным является представление данных в виде линий уровня, использующее производные при сглаживании, а потому более чувствительное к нерегулярностям в дискретных распределениях, таких как изменения числа мюонов в соседних бинах. В этом случае дискретное распределение по числу мюонов в элементах телесного угла преобразуется в непрерывное распределение в виде поверхности, разделённой линиями уровня с фиксированным числом мюонов. Область, заключённая между линиями с числами N_1 и N_2 (где $N_1 < N_2$), соответствует бинам, в которых количество мюонов N заключено в диапазоне $N_1 < N \leq N_2$. На рисунке 4.9б результаты обработки данных детектора б представлены в виде линий уровня.



а) б)
Рисунок 4.9 – Распределение числа мюонов по углам Θ и Φ : а – в виде трехмерной гистограммы, б – в виде линий уровня.

Одной из задач первого этапа эксперимента, именно в решении которой был определяющий вклад автора, была экспериментальная проверка методики, правильности используемых алгоритмов анализа данных и чувствительности детекторов к изменениям количества материала на пути мюонных потоков, приходящих с разных направлений. Эта проверка проводилась на видимых архитектурных элементах помещений ЦПБМ. Анализ результатов измерений показал, что с помощью использованных в работе алгоритмов обработки данных детекторов были успешно распознаны дверные и оконные проёмы, переходы между помещениями размером от 50×50 см на фоне окружающих стен на расстоянии 10–15 м. Этот результат иллюстрируют данные детектора 6, находившегося в подвале ЦПБМ (рисунок 4.10а). На рисунок 4.10б показан фрагмент распределения количества мюонов, полученного в детекторе, на котором выступы, отмеченные цифрами, соответствуют направлениям на пустоты, обозначенным теми же цифрами на рисунок 4.10а.

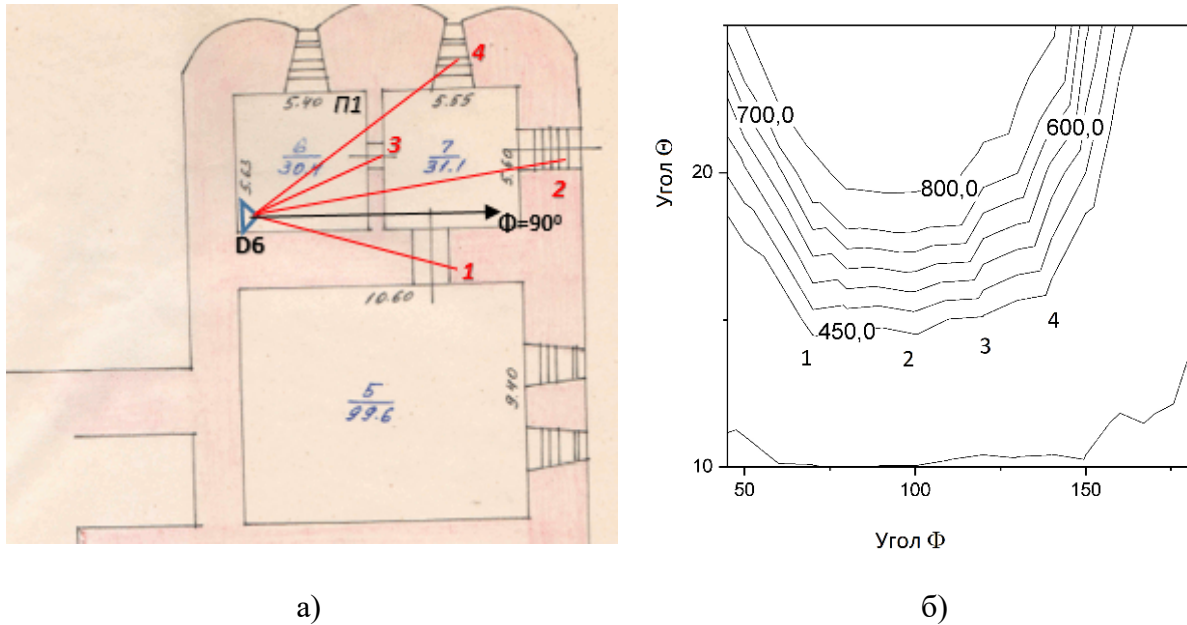


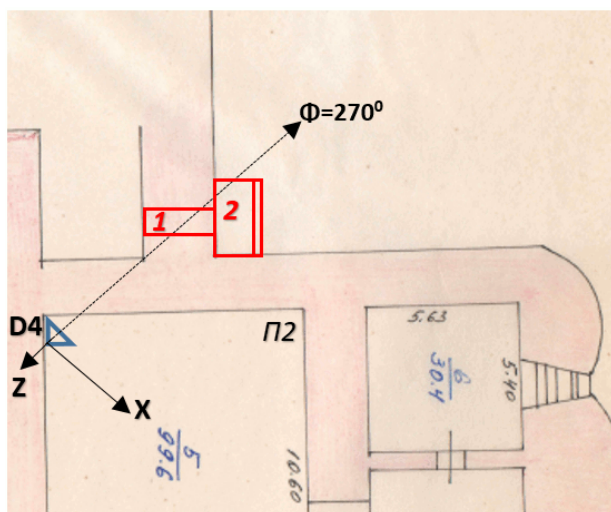
Рисунок 4.10 – а) План части подвала ЦПБМ, просматриваемой детектором 6. Указаны направления, пересекающие элементы здания: 1 – переход из маленького подвального помещения в большое, 2 – вход в подвальные помещения ЦПБМ, 3 – переход между маленькими подвальными помещениями, 4 – окно в маленьком подвальном помещении.

б) Линии уровня, полученные по данным детектора 6 для направления «назад».

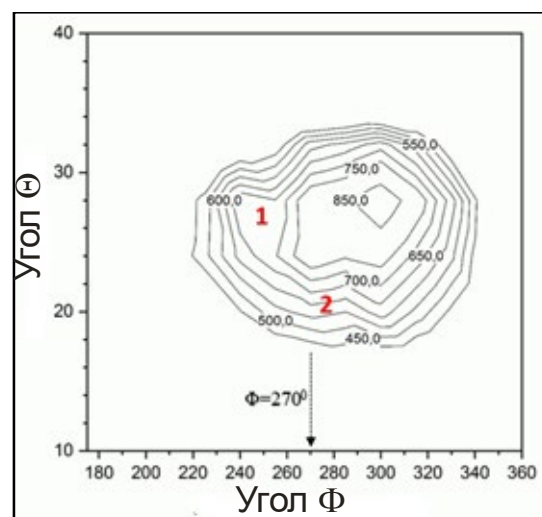
Небольшим локальным объектам, типа дверных или оконных проёмов, соответствуют небольшие пики на линиях уровня.

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 4.11) и 5 (рисунок 4.12).

На рисунке 4.12 представлены экспериментальные результаты (рис. 4.12 б) и фотография видимых по направлению назад объектов: оконных проёмов подвального помещения, где были установлены детекторы (рис. 4.12 а). Экспериментальные результаты, представлены в виде двумерного углового распределения в переменных T_x , T_y . Верхняя полусфера данного распределения ($0 < T_y < 0.6$) показывает данные детектора по направлению назад. Два пика, обозначенные на данном распределении цифрами 1 и 2 находятся в соответствии с геометрическим расположением оконных проёмов, что подтверждает надежность используемого мюнографического алгоритма.



а)



б)



в)

Рисунок 4.11 – 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).

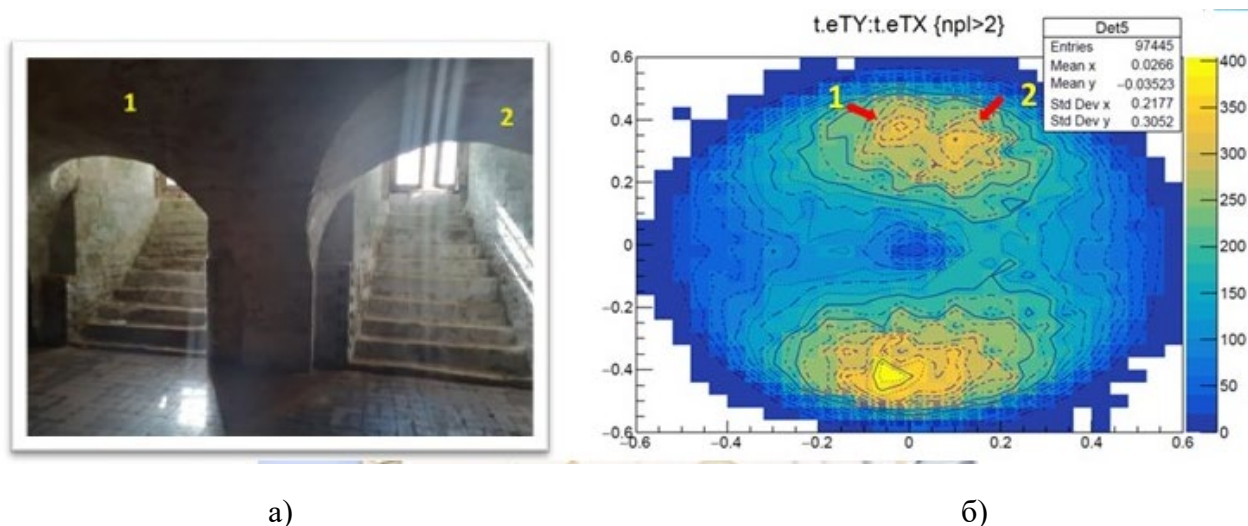


Рисунок 4.12 – Оконные проёмы в подвале ЦПБМ, «увиденные» детектором 5: а – фотография оконных проёмов, б – распределение потоков мюонов в переменных t_x и t_y , цифрами 1 и 2 указаны «сигналы» от оконных проёмов.

Таким образом, регистрация методом мюонографии наблюдаемых архитектурных элементов здания ЦПБМ позволила подтвердить состоятельность авторского подхода 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 [154; 155].

Заключение

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 введён в действие самый большой сканирующий микроскоп комплекса, ПАВИКОМ-1, для сканирования ядерной эмульсии эксперимента SND@LHC. Проведённая модернизация обеспечила корректную настройку новой 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-1 с диапазоном перемещения стола в горизонтальной плоскости 400 мм × 800 мм.

2. Имплементация новых алгоритмов сканирования в программный пакет для обработки эмульсионных пластин большой площади и обеспечения их совместимости с требованиями эксперимента SND@LHC.

3. Модернизация сканирующего комплекса MIC1 в лаборатории университета им. Федерико II (Неаполь) с установкой и вводом в действие новейших линейных двигателей V-412 компании PI, позволившая увеличить скорость сканирования двухсторонних эмульсионных плёнок со 180 до 500 см²/час.

4. Разработка и интеграция в программный пакет ПАВИКОМ нового модуля кластеризации треков 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. Внедрение для мюнографических измерений новой методики подтверждения состоятельности выбранных технических решений и достоверности полученных результатов на основе полученных угловых распределений потоков мюонов для известных архитектурных элементов 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.

Благодарности. Я хотел бы выразить признательность и благодарность моему научному руководителю, Полухиной Наталье Геннадьевне и и.о. начальника управления науки НИТУ МИСИС Красильниковой Юлии Олеговне, а также сотрудникам лаборатории элементарных частиц ФИАН Старкову Николаю Ивановичу, Александрову Андрею Борисовичу, Коноваловой Нине Сергеевне, Щедриной Татьяне Викторовне, Окатьевой Наталье Михайловне, Старковой Елене Николаевне, без которых была бы невозможна данная работа. Отдельно выражаю благодарность Чернявскому Михаилу Михайловичу за совместную работу при модернизации микроскопа ПАВИКОМ-1.

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. — eprint: https://pubs.aip.org/physicstoday/article-pdf/27/7/49/8278340/49\ 2\ _online.pdf. — URL: <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. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6_9.
7. SND@LHC neutrino results / S. Ilieva // *PoS*. — 2024. —Т. LHCP2023. — С. 038.
8. Novel Optical Scanning Technique with an Inclined Focusing Plane / A. Alexandrov, G. De Lellis, V. Tioukov // *Scientific Reports*. — 2019. — Февр. — Т. 9.
9. 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.
10. 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.
11. Muonography of Caves of the Holy Dormition Pskovo-Pechersky Monastery / A. Alexandrov [и др.]. — 2023. — Сент.
12. A Noninvasive Muonography-Based Method for Exploration of Cultural Heritage Objects / A. Alexandrov [и др.] // *Physics of Particles and Nuclei*. — 2022. — Ноябрь. — Т. 53. — С. 1146—1175.

13. Исследование скрытых помещений Свято-Троицкого Данилова монастыря методом мюонной радиографии / А. Александров [и др.] // Ядерная физика. — 2021. — Янв. — Т. 84. — С. 496—501.
14. Photographic Science: Advances in Nanoparticles, J-Aggregates, Dye Sensitization, and Organic Devices / T. Tani // Photographic Science: Advances in Nanoparticles, J-Aggregates, Dye Sensitization, and Organic Devices. — 2011. — Авг. — С. 1—304.
15. Charge identification of highly ionizing particles in desensitized nuclear emulsion using high speed read-out system / T. Toshito [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2006. — Т. 556. — С. 482—489.
16. A new application of emulsions to measure the gravitational force on antihydrogen / C. Amsler [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2012. — Нояб. — Т. 8.
17. The discovery of radioactivity / P. Radvanyi, J. Villain // Comptes Rendus Physique. — 2017. — Т. 18, № 9. — С. 544—550. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070517300786> ; Science in the making: The Comptes rendus de l'Académie des sciences throughout history.
18. The photographic action of the α -particles emitted from radio-active substances / S. Kinoshita // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. — 1910. — Т. 83, № 564. — С. 432—453.
19. A new photographic emulsion for the detection of fast charged particles / C. Powell [и др.] // Journal of Scientific Instruments. — 1946. — Т. 23, № 5. — С. 102.
20. THE EMULSION CHAMBER-A NEW PHOTOGRAPHIC TOOL FOR THE STUDY OF IONIZING PARTICLE TRACKS / H. Yagoda // PHYSICAL REVIEW. Т. 79. — AMERICAN PHYSICAL SOC ONE PHYSICS ELLIPSE, COLLEGE PK, MD 20740-3844 USA. 1950. — С. 207—207.
21. Techniques for processing thick nuclear emulsions / B. Stiller, M. M. Shapiro, F. W. O'Dell // Review of Scientific Instruments. — 1954. — Т. 25, № 4. — С. 340—348.
22. Processes Involving Charged Mesons / Lattes, C. M. G. [и др.] // Nature. — 1947. — Т. 159, № 4047. — С. 694—697.
23. Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions / Lattes, C. M. G. [и др.] // Nature. — 1947. — Т. 160, № 4067. — С. 486—492.
24. The Energy Spectrum of Primary Cosmic Radiation / M. F. Kaplon [и др.] // Physical Review. — 1952. — Янв. — Т. 85, № 2. — С. 295—309.
25. LXXX. The electrical resistivity of liquid iron / R. Powell // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. — 1953. — Т. 44, № 354. — С. 772—775.

26. Soryusi-ron Kenkyu / J. Nishimura // Japan. — 1956. — Т. 12. — С. 24.
27. Proc. of the I International Workshop on Nuclear Emulsion Techniques / K. Niu // Nagoya, June. — 1998.
28. CHACALTAYA Emulsion Chamber Experiment / C. M. G. Lattes [и др.] // Progress of Theoretical Physics Supplement. — 1971. — ЯНВ. — Т. 47. — С. 1—125.
29. Composition and energy spectra of cosmic-ray primaries in the energy range 10^{13} - 10^{15} eV/particle observed by Japanese-Russian joint balloon experiment / A. V. Aranasenko [и др.] // Astroparticle Physics. — 2001. — Окт. — Т. 16, № 1. — С. 13—46.
30. JACEE emulsion chambers for studying the energy spectra of high energy cosmic ray protons and helium / T. H. Burnett [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. — 1986. — Ноябрь. — Т. 251, № 3. — С. 583—595.
31. Possible Decay in Flight of a New Type Particle / K. Niu, E. Mikumo, Y. Maeda // Progress of Theoretical Physics. — 1971. — Ноябрь. — Т. 46, № 5. — С. 1644—1646.
32. Experimental details on lifetime measurements of neutrino-produced charmed particles in a tagged emulsion spectrometer / Ushida N. [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 1984. — Т. 224. — №. 1-2. — С. 50— 64.
33. Observation of a likely example of the decay of a charmed particle produced in a high energy neutrino interaction / E. H. S. Burhop [и др.] // Physics Letters B. — 1976. — Ноябрь. — Т. 65, № 3. — С. 299—304.
34. Investigation of the decay of charmed particles produced in neutrino interactions / D. Allasia [и др.] // Nuclear Physics B. — 1980. — Дек. — Т. 176, № 1. — С. 13—36.
35. On the lifetime of charged charmed particles first direct observation of a charmed baryon decay / C. Angelini [и др.] // Physics Letters B. — 1979. — Июнь. — Т. 84, № 1. — С. 150—155.
36. First direct observation of the decay of neutral charmed particles produced by neutrinos in emulsion / D. Allasia [и др.] // Physics Letters B. — 1979. — Ноябрь. — Т. 87, № 3. — С. 287—291.
37. Observation of a Dimuon Resonance at 9.5 GeV in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions / S. W. Herb [и др.] // — 1977. — Авг. — Т. 39, № 5. — С. 252—255.
38. A hybrid experiment to search for beauty particles / S. Aoki [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. — 1989. — ЯНВ. — Т. 274, № 1/2. — С. 64—78.
39. Experimental search for associated gluino production and decay in 350 GeV/c π - emulsion interactions / R. Arnold [и др.] // Physics Letters B. — 1987. — Т. 186, № 3/4. — С. 435—439.

40. Hybrid emulsion spectrometer for the detection of hadronically produced heavy flavor states / K. Kodama [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. — 1990. — Апр. — Т. 289, № 1/2. — С. 146—167.
41. Fully automated emulsion analysis system / S. Aoki [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 1990. — Окт. — Т. 51, № 4. — С. 466—472.
42. Measurement of the Lifetimes of Charged and Neutral Beauty Hadrons: Fermilab E653 Collaboration / K. Kodama [и др.] // Progress of Theoretical Physics. — 1993. — Март. — Т. 89, № 3. — С. 679—676.
43. Charm production in a quark-gluon plasma / A. Shor // Physics Letters B. — 1998. — Дек. — Т. 215, № 2. — С. 375—380.
44. The production of charmed particles in high-energy ^{16}O -emulsion central interactions / S. Aoki [и др.] // Physics Letters B. — 1989. — Июль. — Т. 224, № 4. — С. 441—444.
45. A hybrid set-up to study charmed particle production in ^{32}S -nucleus central interactions / N. Armenise [и др.] // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. — 1995. — Июль. — Т. 361, № 3. — С. 497—505.
46. Investigation of Central Pb-Pb Interactions at Energies of 160 GeV/Nucleon with the Help of the Emulsion Magnetic Chamber / E.G. Boos [и др.] // Experiments at CERN in 1996. . — С. 122—123.
47. Pattern Recognition in High Multiplicity Events / N.M. Astafyeva [и др.] // Mod.Phys.Lett. A12. — 1997.— С. 1185—1192.
48. Кольцевые события в адронных процессах при высоких энергиях / И. М. Дремин [и др.] // Письма в ЖЭТФ. — 1984. — Окт. — Т. 40, № 7. — С. 320—323.
49. Progress of Theoretical Physics Supplement / Sakai T., [и др.] // — 2000. — Т. 137. — С. 121— 145.
50. He $\Lambda \Lambda$ Double Hyperfragment / Prowse D. J. // Physical Review Letters. — 1966. — Т. 17. — №. 14. — С. 782.
51. Production of two single- Λ hypernuclei by Ξ -capture / Aoki S. [и др.] // Progress of theoretical physics. — 1993. — Т. 89. — №. 2. — С. 493— 500.
52. Observation of a H $\Lambda \Lambda$ Ξ Double Hypernucleus / Takahashi H. [и др.] // Physical review letters. — 2001. — Т. 87. — №. 21. — С. 212502.
53. Study of double strangeness nuclei by an emulsion-scintillating fiber hybrid method / Nakazawa K. // Nuclear Physics A. — 1995. — Т. 585. — №. 1-2. — С. 75— 78.
54. The CHORUS experiment to search for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillation / Eskut E. [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1997. — Т. 401. — №. 1. — С. 7— 44.

55. A facility at CERN for pouring the photographic emulsions for nuclear and particle research / Hoshino K., Rosa G. //International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. — 1986. — Т. 12. — №. 1-6. — С. 477—481.
56. Observation of one event with the characteristics of associated charm production in neutrino charged-current interactions / Kayis-Topaksu A. [и др.] //Physics Letters B. — 2002. — Т. 539. — №. 3-4. — С. 188-196.
57. Measurement of charm production in neutrino charged-current interactions / Kayis-Topaksu A. [и др.]. //New journal of physics. — 2011. — Т. 13. — №. 9. — С. 093002.
58. Search for charmed pentaquarks in high energy anti-neutrino interactions / De Lellis G. [и др.] //Nuclear Physics B. — 2007. — Т. 763. — №. 1-2. — С. 268-282.
59. Nuclear Emulsions: Particle Detectors and Detector Systems / De Lellis [и др.] //. — 2011. — С. 262—287
60. Observation of tau neutrino interactions / Kodama K. [и др.]. //Physics Letters B. — 2001. — Т. 504. — №. 3. — С. 218-224.
61. Final tau-neutrino results from the DONuT experiment / Kodama K. [и др.]. //Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology. — 2008. — Т. 78. — №. 5. — С. 052002.
62. Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos / Fukuda, Y. [и др.]. // Physical Review Letters. — 1998. — Август. — Т. 81, № 8. — С. 1562—1567.
63. Measurement of neutrino oscillation by the K2K experiment / Ahn, M. H. [и др.]. // Physical Review D. — 2006. — Октябрь. — Т. 74, № 7. — С. 072003.
64. Conference on Particle and Nuclear Astrophysics and Cosmology in the next Millennium / Niwa K. [и др.]. — Snowmass, 1994.
65. OPERA: an emulsion detector for a long baselin ν_{μ} – ν_{τ} oscillation search / Ereditato A., [и др.]. //Nuclear Physics B-Proceedings Supplements. — 1998. — Т. 66. — №. 1-3. — С. 423-427.
66. OPERA: an emulsion detector for a long baselin ν_{μ} – ν_{τ} oscillation search / Ereditato A., [и др.]. //Nuclear Physics B-Proceedings Supplements. — 1998. — Т. 66. — №. 1-3. — С. 423-427.
67. OPERA: Long baseline neutrino oscillation experiment / Guler M. //Balkan Phys. Lett. — 2009. — Т. 17. — С. 211-215.
68. The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam / Acquafredda R. [и др.]. //Journal of Instrumentation. — 2009. — Т. 4. — №. 04. — С. P04018.

69. Final results on $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillation from the CHORUS experiment / Eskut E. [и др.]. //Nuclear physics B. — 2008. — Т. 793. — №. 1-2. — С. 326-343.
70. The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam / Acquafredda R. [и др.]. //Journal of Instrumentation. — 2009. — Т. 4. — №. 04. — С. P04018.
71. Emulsion sheet doublets as interface trackers for the OPERA experiment / Anokhina A. [и др.]. // Journal of Instrumentation. — 2008. — Т. 3. — №. 07. — С. P07005.
72. Sub-micron alignment for nuclear emulsion plates using low energy electrons caused by radioactive isotopes / Miyamoto S. [и др.]. //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2007. — Т. 575. — №. 3. — С. 466-469.
73. Sub-micron alignment for nuclear emulsion plates using low energy electrons caused by radioactive isotopes / Miyamoto S. [и др.]. //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2007. — Т. 575. — №. 3. — С. 466-469.
74. Observation of a first ν_{τ} candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam / Agafonova N. [и др.]. // Physics Letters B. — 2010. — Т. 691. — №. 3. — С. 138-145.
75. New results on $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam / Agafonova N. [и др.]. //Journal of High Energy Physics. — 2013. — Т. 2013. — №. 11. — С. 1-32.
76. The OPERA experiment and its contribution to neutrino physics. / De Lellis G. — 2017.
77. Final Results of the OPERA Experiment on ν_{τ} Appearance in the CNGS Neutrino Beam / Agafonova N. [и др.]. //Physical review letters. — 2018. — Т. 120. — №. 21. — С. 211801.
78. First observation of a tau neutrino charged current interaction with charm production in the OPERA experiment: OPERA Collaboration / Agafonova N. [и др.]. //The European Physical Journal C. — 2020. — Т. 80. — С. 1-10.
79. Search for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam / Agafonova N. [и др.]. //Journal of High Energy Physics. — 2013. — Т. 2013. — №. 7. — С. 1-16.
80. Final results of the search for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ oscillations with the OPERA detector in the CNGS beam / Agafonova N. [и др.]. //Journal of High Energy Physics. — 2018. — Т. 2018. — №. 6. — С. 1-15.
81. Limits on muon-neutrino to tau-neutrino oscillations induced by a sterile neutrino state obtained by OPERA at the CNGS beam / Agafonova N. [и др.]. //Journal of High Energy Physics. — 2015. — Т. 2015. — №. 6. — С. 1-13.

82. Automatic device for measurements of heavy ion tracks in plastics / S. Di Liberto, P. Ginobbi // *Nuclear Instruments and Methods* — 1977. — Т. 147. — №. 1. — С. 75-78.
83. Real-time automatic evaluation of solid state nuclear track detectors with an on-line TV-device / W. Abmayr [и др.]. // *Nuclear Instruments and Methods*. — 1977. — Т. 147. — №. 1. — С. 79-81.
84. A high precision video-electronic measuring system for use with solid state track detectors / J.U. Schott [и др.]. // *Nuclear Instruments and Methods* — 1977. — Т. 147. — №. 1. — С. 63-67.
85. Discovery of naked charm particles and lifetime differences among charm species using nuclear emulsion techniques innovated in Japan / Niu [и др.] // . — 2008. — Т. 84, № 1. — С. 1—16
86. Automatic analysis of digitized TV-images by a computer-driven optical microscope / Rosa G. [и др.]. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 1997. — Т. 394. — №. 3. — С. 357-367.
87. Detection and analysis of tau-neutrino interactions in DONUT emulsion target / Kodama K. [и др.]. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2002. — Т. 493. — №. 1-2. — С. 45-66.
88. High precision measurements with nuclear emulsions using fast automated microscopes / De Serio M. [и др.]. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2005. — Т. 554. — №. 1-3. — С. 247-254.
89. Altered hippocampal long-term potentiation after peripheral nerve injury in mice / Kodama D., Ono H., Tanabe M. // *European journal of pharmacology*. — 2007. — Т. 574. — №. 2-3. — С. 127-132.
90. Track reconstruction in the emulsion-lead target of the OPERA experiment using the ESS microscope / Arrabito L. [и др.]. // *Journal of Instrumentation*. — 2007. — Т. 2. — №. 05. — С. P05004.
91. Detection of Radiation Tracks Recorded on Silver-Salt Photographic Materials by Fluorescence-Labeling Method / Kuge K. [и др.]. // *Japanese Journal of Applied Physics*. — 2013. — Т. 52. — №. 10R. — С. 106402.
92. High-speed particle tracking in nuclear emulsion by last-generation automatic microscopes / Armenise N. [и др.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:*

- Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2005. — Т. 551. — №. 2-3. — С. 261-270.
93. A novel automatic film changer for high-speed analysis of nuclear emulsions / Borer K. [и др.]. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2006. — Т. 566. — №. 2. — С. 327-337.
94. A new generation scanning system for the high-speed analysis of nuclear emulsions. / Alexandrov A. [и др.] // JINST 11. // P06002, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/06/P06002>. — 2016. — Т. 6002.
95. Hardware performance of a scanning system for high-speed analysis of nuclear emulsions / Arrabito L. [и др.]. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2006. — Т. 568. — №. 2. — С. 578-587.
96. SND@ LHC: the scattering and neutrino detector at the LHC / Acampora G. [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2024. — Т. 19. — №. 05. — С. P05067.
97. A new fast scanning system for the measurement of large angle tracks in nuclear emulsions / Alexandrov A. [и др.]. // Journal of Instrumentation. — 2015. — Т. 10. — №. 11. — С. P11006.
98. The Scattering and Neutrino Detector at the Large Hadron Collider in CERN / Polukhina N., Konovalova N., Shchedrina T. // Physics. — 2023. — Т. 5. — №. 2. — С. 499-507.
99. Recent developments in heavy-ion fusion reactions / Back B. B. [и др.]. // Reviews of Modern Physics. — 2014. — Т. 86. — №. 1. — С. 317-360.
100. Физика тяжелых ионов и ее приложения: Учебное пособие. / Оганесян Ю. Ц. [и др.] — Издательский отдел, 2021. — №. JDS-2021-00200.
101. Новая область ядерной стабильности / Оганесян Ю. Ц. // Вестник Российской академии наук. — 2001. — Т. 71. — №. 7. — С. 590–599.
102. Phosphate glasses for identification of heavy ions / Price P. B., Cook L. M., Markert A. // Nature. — 1987. — Т. 325. — №. 6100. — С. 137-138.
103. 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.
104. 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.

105. Science and technology with nuclear tracks in solids / Price P. B. //Radiation Measurements. — 2005. — Т. 40. — №. 2-6. — С. 146-159.
106. Application of Ag⁺-doped phosphate glasses as nuclear track etch detectors / Kodaira S. [и др.] // Radiation measurements. — 2014. — Т. 71. — С. 537-540.
107. Диэлектрические детекторы и их использование в экспериментальной ядерной физике / Третьякова С. П. //Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 1992. — Т. 23. — №. 2. — С. 364–429.
108. Nuclear tracks in solids: principles and applications. / Fleischer R. L., Price P. B., Walker R. M. // — Univ of California Press, 2022.
109. Method of an automated search for rare events of superheavy nuclei decay using phosphate glass detectors / Goncharova L. A. [и др.] //Physics of Atomic Nuclei. — 2020. — Т. 83. — С. 1304-1312.
110. Стекланные трековые детекторы / Николаев В. А., Перелыгин В. П. // Приборы и техника эксперимента. — 1976. — №. 2. — С. 7–17.
111. Radiographic imaging with cosmic-ray muons / Borozdin K. N. [и др.] // Nature. — 2003. — Т. 422. — №. 6929. — С. 277-277.
112. Forward scattering effects on muon imaging / Gómez H. [и др.] // JINST, 12 //P12018. — 2017.
113. Muon radiography method for fundamental and applied research / Alexandrov A. B. [и др.] // Physics-Uspekhi. — 2017. — Т. 60. — №. 12. — С. 1277.
114. Muon imaging: Principles, technologies and applications / Procureur S. //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2018. — Т. 878. — С. 169-179.
115. Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV / Groom D. E., Mokhov N. V., Striganov S. I. // Atomic Data and Nuclear Data Tables. — 2001. — Т. 78. — №. 2. — С. 183-356.
116. Atmospheric muon flux at sea level, underground, and underwater / Bugaev E. V. [и др.] //Physical Review D. — 1998. — Т. 58. — №. 5. — С. 054001.
117. Study of single muons with the Large Volume Detector at the Gran Sasso Laboratory / Aglietta M. [и др.] //Physics of Atomic Nuclei. — 2003. — Т. 66. — С. 123-129.
118. Review of particle physics, Prog. Theor / Zyla P. A. [и др.] // Exp. Phys. — 2020. — Т. 2020. — №. 510. — С. 083C01.
119. Пётр Петрович Лазарев (К десятилетию со дня смерти) / Кравков С. В. // Успехи физических наук. — 1952. — Т. 46. — №. 4. — С. 441–449.
120. Commonwealth Engineer / George E. P. // July. — 1955. — Т. 1. — С. 455.

121. Cosmic muon detection for geophysical applications / Oláh L. [и др.] // *Advances in High Energy Physics*. — 2013. — Т. 2013. — №. 1. — С. 560192.
122. Jourde K. [и др.] Muon dynamic radiography of density changes induced by hydrothermal activity at the La Soufrière of Guadeloupe volcano, *Sci. Rep.*, 6, 33406 [Электронный ресурс].
123. Visualization of the internal structure of volcanoes with cosmic-ray muons / Tanaka H. K. M. // *Journal of the Physical Society of Japan*. — 2016. — Т. 85. — №. 9. — С. 091016.
124. First measurement of ice-bedrock interface of alpine glaciers by cosmic muon radiography / Nishiyama R. [и др.] // *Geophysical Research Letters*. — 2017. — Т. 44. — №. 12. — С. 6244-6251.
125. First muography of Stromboli volcano / Tioukov V. [и др.] // *Sci. Rep.* 9 (2019) 6695.
126. Muon radiography for exploration of Mars geology / Kedar S. [и др.] // *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*. — 2013. — Т. 2. — №. 1. — С. 157-164.
127. Search for Hidden Chambers in the Pyramids: The structure of the Second Pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption / Alvarez L. W. [и др.] // *Science*. — 1970. — Т. 167. — №. 3919. — С. 832-839.
128. Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons / Morishima K. [и др.] // *Nature*. — 2017. — Т. 552. — №. 7685. — С. 386-390.
129. Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples) / Saracino G. [и др.] // *Scientific reports*. — 2017. — Т. 7. — №. 1. — С. 1181.
130. Muon radiography of large industrial structures / Gilboy W. B. [и др.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. — 2007. — Т. 263. — №. 1. — С. 317-319.
131. Tests of cosmic ray radiography for power industry applications / Durham J. M. [и др.] // *AIP Advances*. — 2015. — Т. 5. — №. 6.
132. Blind test of muon geotomography for mineral exploration / Bryman D., Bueno J., Jansen J. // *ASEG Extended Abstracts*. — 2015. — Т. 2015. — №. 1. — С. 1-3.
133. Borehole muography of subsurface reservoirs / Bonneville A. [и др.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. — 2019. — Т. 377. — №. 2137. — С. 20180060.
134. Muography and its potential applications to mining and rock engineering / Zhang Z. X. [и др.] // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. — 2020. — С. 1-15.
135. Cosmic ray radiography of the damaged cores of the Fukushima reactors / Borozdin K. [и др.] // *Physical review letters*. — 2012. — Т. 109. — №. 15. — С. 152501.
136. Cosmic-ray imaging of Fukushima Daiichi nuclear power plant / Morishima K. // *J. Soc. Photograph. Sci. Tech. Jpn.* — 2016. — Т. 79. — С. 42-47.

137. Investigation of the Unit-1 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography / Fujii H. [и др.] // *Progress of Theoretical and Experimental Physics*. — 2020. — Т. 2020. — №. 4. — С. 043C02.
138. Investigation of the status of Unit 2 nuclear reactor of the Fukushima Daiichi by Cosmic Muon Radiography / Fujii H. [и др.] // *Progress of Theoretical and Experimental Physics*. — 2021. — Т. 2021. — №. 2. — С. 023C01.
139. Cosmic-ray muon spin rotation in Fe and industrial application / Nagamine K. [и др.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2014. — Т. 551. — №. 1. — С. 012064.
140. 3D muography for the search of hidden cavities / Cimmino L. [и др.] // *Scientific reports*. — 2019. — Т. 9. — №. 1. — С. 2974.
141. Prospects of the study of geological structures by muon radiography based on emulsion track detectors / Dedenko L. G. [и др.] // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. — 2014. — Т. 41. — С. 235-241.
142. Muon radiography in Russia with emulsion technique. First experiments future perspectives / Aleksandrov A. B. [и др.] // *AIP Conference Proceedings*. — AIP Publishing, 2015. — Т. 1702. — №. 1.
143. Large industrial and natural objects investigation by the muon radiography on the basis of track detectors / Baklagin S. A. [и др.] // *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* — 2016. — Т. 5. — С. 0507027.
144. Current status and prospects of nuclear physics research based on tracking techniques / Alekseev V. A. [и др.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2017. — Т. 798. — №. 1. — С. 012207.
145. Muography of large natural and industrial objects / Alexandrov A. B. [и др.] // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2021. — Т. 84. — С. 1114-1120.
146. *Particle Physics Reference Library: Volume 2: Detectors for Particles and Radiation.* / Fabjan C. W. [и др.] // — Springer Nature, 2020. — Т. 2.
147. Exploration of underground structures in the Holy Trinity Danilov Monastery by muon radiography method / Konovalova N. S. [и др.] // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. — 2021. — Т. 48. — С. 175-180.
148. Methodical notes on the use of cosmic muons in radiography / Zemskova S. G., Starkov N. I. // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. — 2015. — Т. 42. — С. 37-42.
149. Results of the model experiment on cosmic muon radiography of a mountain / Zemskova S. G., Starkov N. I. // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. — 2015. — Т. 42. — С. 157-164.

150. Measurements of ground-level muons at two geomagnetic locations / Kremer J. [и др.] // *Physical Review Letters*. — 1999. — Т. 83. — №. 21. — С. 4241.
151. Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV / Groom D. E. [и др.] // *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. — 2001. — Т. 78. — №. 2. — С. 183-356.
152. Upgrade and new applications of the automated high-tech scanning facility PAVICOM for data processing of track detectors / Alexandrov A. [и др.] // *Measurement*. — 2022. — Т. 187. — С. 110244.
153. The FEDRA–Framework for emulsion data reconstruction and analysis in the OPERA experiment / Tioukov V. [и др.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2006. — Т. 559. — №. 1. — С. 103-105.
154. 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.
155. 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.