

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

На правах рукописи

Щедрина Татьяна Викторовна

**Новые детекторные решения на основе ядерных фотоэмульсий
в фундаментальных экспериментах по физике элементарных частиц
и мюонографии объектов культурного наследия**

Специальность 1.3.2 - приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 2025

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Восстановление производства фотографической эмульсии в России	21
1.1 Производство ядерной фотоэмульсии для научных исследований.....	21
1.2 Оценка качества российской фотографической эмульсии	34
1.3 Исследование процесса старения фотографической эмульсии	41
1.4 Процедура "рефрешинга" (emulsions refreshing)	51
Глава 2. Фундаментальные исследования с использованием ядерной фотоэмульсии на базе обработки данных на комплексе ПАВИКОМ	54
2.1 Сканирующий комплекс ПАВИКОМ	54
2.2 Эксперимент OPERA	61
2.3 Эксперимент SND@LHC	72
Глава 3. Методика мюонографических экспериментов на основе эмульсионных детекторов	85
3.1 Характеристики потоков атмосферных мюонов	85
3.2 Реконструкция треков в мюонографических экспериментах с фотоэмульсией в качестве трекового детектора	90
3.2.1 Используемое программное обеспечение	90
3.2.2 Распознавание изображений	92
3.2.3 Реконструкция МТ и оценка качества сканирования	97
3.2.4 Реконструкция ОТ	102
3.2.5 Оценка минимального количества фотоэмульсионных слоев в детекторе	105
Глава 4. Мюонографические исследования крупных природных и промышленных объектов	114
4.1 Апробация метода - тестовые эксперименты	114
4.2 Мюонография шахты Геофизической службы РАН	121
4.3 Эксперимент в крепости Нарын-кала, Дербент	130
4.4 Мюонографические исследования в Свято-Троицком Даниловом монастыре, Переславль-Залесский	140
4.5 Пещерный храм Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, Печоры	170
Заключение	199

Список цитированной литературы:	201
Приложение	210
Программное обеспечение для автоматической реконструкции треков.....	210

Введение

Актуальность тематики исследования

Развитие современной экспериментальной физики требует разработки новых детекторных систем и усовершенствованных высокотехнологичных измерительных систем, что приводит к необходимости решения целого ряда актуальных нетривиальных наукоёмких задач.

Специфика экспериментальной научной деятельности автора связана с методикой фотографических ядерных эмульсий. Эмульсионные трековые детекторы широко используются в экспериментах по физике частиц с 1896 года (пионерская работа лауреата Нобелевской премии Антуана Анри Беккереля) и по настоящее время, поскольку обладают беспрецедентно высоким пространственным разрешением по сравнению с другими детекторами, применяемыми в экспериментальной ядерной физике и физике частиц, и обеспечивают возможность надёжного разделения треков. Диапазон экспериментов с использованием ядерных эмульсий в настоящее время очень широк: это изучение свойств ядер и элементарных частиц в ускорительных экспериментах, регистрация потоков частиц космического излучения на аэростатах в стратосфере, исследование внутренней структуры крупных природных, археологических и промышленных объектов неинвазивным методом мюнографии и др. [1–6].

Существенным недостатком всех предыдущих экспериментов, основанных на использовании ядерных фотоэмульсий, была трудоёмкость обработки данных, проводившаяся операторами на оптических микроскопах вручную. Это требовало огромных затрат труда и времени. Скорость измерений при этом оказывалась невысокой, что определяло низкую статистику обработанных событий. Кроме того, при таких измерениях была достаточно велика вероятность появления трудно улавливаемых ошибок. Это привело к тому, что в конце двадцатого века, из-за трудностей обработки данных и с развитием других методов детектирования, спрос на промышленную

высококачественную ядерную фотоэмульсию резко сократился, и предприятия-производители (Ильфорд, Англия; Истмен-Кодак, США; Геверт, Бельгия; Фуджи, Япония; ОРВО, ГДР; ГОСНИИХИМФОТОПРОЕКТ, СССР) закрыли её производство.

Решающим фактором для возобновления исследований на основе эмульсионных детекторов было практически одновременное решение двух проблем - восстановления производства высококачественной ядерной эмульсии и создания сканирующих микроскопов на основе оптических столов с высокой точностью автоматизированного перемещения и современных приборов с зарядовой связью.

Это снова стимулировало интерес сообщества к методикам детектирования, основанным на использовании ядерных фотоэмульсий. Как следствие, крайне актуальной стала проблема восстановления производства этих эмульсий, которое может быть реализовано исключительно с использованием сложных технологий на основе коллоидной химии в условиях промышленного производства. Кустарные методы производства не могут обеспечить стабильные параметры ядерных эмульсий, необходимые для прецизионных экспериментов. Решение проблемы восстановления производства потребовало разработки методик исследования, тестирования и оптимизации параметров фотоэмульсий, направленных на создание эффективных технологических процессов, обеспечивающих стабильное промышленное производство высококачественных эмульсий. При активном участии автора диссертации эта задача была успешно решена. Производство ядерной фотоэмульсии в России было восстановлено с 2010 (ООО «СЛАВИЧ», Переславль-Залесский). В настоящее время только Россия и Япония обладают технологиями производства релятивистских ядерных эмульсий, которые успешно применяются во многих экспериментальных лабораториях мира.

Проблема обработки эмульсионных данных была в значительной мере преодолена благодаря прогрессу в создании оптических столов с высокой

точностью автоматизированного перемещения, применению современных приборов с зарядовой связью для регистрации и оцифровывания оптических изображений и вычислительным возможностям современных компьютеров. Однако, ни одна из производимых промышленностью систем для автоматического анализа изображений не была сконструирована специально для обработки данных, получаемых с помощью эмульсионных детекторов. Это актуализировало задачу доработки и авторской модификации коммерческих систем и комплектующих при создании автоматизированных оптических систем обработки эмульсионных данных, оптимизированных для фундаментальных исследований, например, [7–9]. Создание таких систем дало возможность реализации уникальных экспериментов по физике элементарных частиц, направленных на решение актуальных проблем физики двадцать первого века, например, поиск явлений Новой физики.

Цели и задачи работы

Основной целью представленной работы являлась разработка комплексных детекторных физических и технологических решений по регистрации и идентификации релятивистских заряженных частиц в широком диапазоне ядерно-физических экспериментов, представляющих большой фундаментальный и практический интерес. В частности, была реализована возможность проведения фундаментальных и прикладных исследований по физике элементарных частиц на основе эмульсионной трековой методики с использованием ядерной фотоэмульсии российского производства.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

1. Восстановить производство высококачественных российских ядерных фотоэмульсий:

1.1. Разработать и согласовать с российским производителем новые технические требования, которым должна удовлетворять современная ядерная фотоэмульсия для научных исследований.

1.2. Выбрать и протестировать оптимальный для условий проведения экспериментов желатин – один из основных компонентов состава ядерной фотоэмульсии. Выборку сделать из желатинов основных мировых производителей: PB Gelatin, Бельгия; GELITA, Германия; Rousselot, Франция; Nitta Gelatin, Япония; Eastman Gelatine Corporation, США; JSC Mojelit, Белоруссия.

1.3. Протестировать не менее ~ 100 синтезов ядерной фотоэмульсии в процессе усовершенствования методики изготовления, полива эмульсионного геля, рецептуры проявки готовых слоев, а также условий хранения и транспортировки.

1.4. Разработать методику микроскопической оценки контроля качества ядерной фотоэмульсии с использованием сканирующего комплекса ПАВИКОМ и на её основе выполнить экспертную проверку качества выпускаемой продукции (не менее ~ 200 синтезов российской ядерной фотоэмульсии) для использования в фундаментальных и прикладных исследованиях.

1.5. Экспериментально исследовать изменение свойств российской ядерной фотоэмульсии с течением времени.

1.6. Эмпирическим путём подобрать параметры процедуры “refreshing” российской ядерной фотоэмульсии для экспериментов с регистрацией однозарядных частиц с минимальной потерей эффективности фотоэмульсионного слоя.

2. Адаптировать программное обеспечение ПАВИКОМ для сканирования данных экспериментов OPERA и SND@LHC:

2.1. Адаптировать программное обеспечение сканирующего комплекса ПАВИКОМ для обработки и физического анализа данных экспериментов OPERA и SND@LHC.

2.2. Отсканировать около 60 эмульсионных детекторных «кирпичей» эксперимента OPERA, с занесением результатов сканирования в единую базу ЦЕРН.

2.3. В рамках международной коллаборации SND@LHC разработать оптимальную конструкцию гибридного детектора с применением эмульсионных технологий.

3. Разработать и тестировать методику мюонографии крупных объектов на основе использования эмульсионных детекторов:

3.1. Для реализации мюонографических исследований в России определить в тестовом эксперименте минимальное количество эмульсионных слоев, необходимых для эффективной реконструкции треков атмосферных мюонов в различных диапазонах углов.

3.2. Выполнить первые в России натурные тестовые мюонографические эксперименты, в ходе которых разработать принципиальную механическую конструкцию детектора, определить оптимальные условия экспозиции, создать эффективные алгоритмы обработки и анализа данных.

4. Выполнить мюонографические исследования скрытой внутренней структуры объектов культурного наследия:

4.1. На примере работ по исследованию памятников культурного наследия в России реализовать серию мюонографических экспериментов с использованием эмульсионных трековых детекторов, продемонстрировав на полученных экспериментальных результатах внедренческие перспективы эффективного, экономичного и экологически безопасного метода мюонографии в области геологии, ядерной энергетики, вулканологии, дефектоскопии, археологии и других областях.

Научная новизна, достоверность и практическая значимость работы

Разработана комплексная методика микроскопического анализа и контроля качества современной ядерной фотоэмульсии, что позволило не только восстановить ее производство в России на уровне лучших мировых стандартов, но и обеспечить выход на международный рынок. Выполненная в процессе отработки технологии производства эмульсии серия новых уникальных методических исследований российской ядерной фотоэмульсии подтвердила стабильность ее технических характеристик. Это делает возможным использование российской ядерной фотоэмульсии в фундаментальных исследованиях на ускорителях с минимальной потерей эффективности фотоэмульсионного слоя и с длительным временем экспозиции.

Сканирование и физический анализ эмульсионных пленок, в том числе, автором на комплексе ПАВИКОМ, в рамках международного эксперимента OPERA позволили получить убедительные доказательства осцилляций нейтрино. Открытие осцилляций мюонных нейтрино в тау-нейтрино со статистической значимостью $6,1\sigma$ на основе наблюдения десяти ν_τ событий стало главным результатом эксперимента OPERA.

В новом черновском эксперименте SND@LHC для нейтринной мишени разработана концепция чередования эмульсионных слоев с вольфрамовыми пластинами. Для достижения сложной цели эксперимента SND@LHC по идентификации различных типов нейтрино слабо взаимодействующих частиц потребовалось создание гибридного детектора, сочетающего в себе технологию ядерной эмульсии и электронные детекторы. Таким образом, детектор SND@LHC позволяет различать взаимодействия нейтрино всех трех ароматов и исследовать процесс рождения очарованных частиц в области псевдобыстрот, недоступных для других экспериментов. В 2023 году обнаружены восемь событий-кандидатов на взаимодействия мюонных нейтрино с превышением сигнала над фоном семь стандартных отклонений. Этот результат подтверждает эффективность использования компактных эмульсионных детекторов для

регистрации ускорительных нейтрино высоких энергий и открывает возможности для их изучения на высокой статистике.

Впервые в России проведена серия мюнографических экспериментов с использованием эмульсионных детекторов по неинвазивному исследованию объектов культурного наследия, в ходе которых выявлены неизвестные ранее их скрытые структурные особенности. Разработаны рекомендации по оптимальному количеству эмульсионных слоев для эффективного распознавания треков атмосферных мюонов и механическая конструкция детекторов, определены оптимальные условия экспозиции, созданы эффективные алгоритмы обработки и анализа данных.

Достоверность полученных в работе результатов была многократно подтверждена:

- при экспертных проверках качества российской эмульсии в ЦЕРНе и Университете Фредерико II в Неаполе;

- при публикации результатов фундаментальных исследований в высокорейтинговых журналах с прохождением детализированной процедуры рецензирования;

- в ходе обсуждения полученных результатов на международных и российских конференциях;

- при успешной реализации серии мюнографических экспериментов, подтвердивших правильность созданной комплексной авторской методики исследований;

- путем проверки данных, полученных на ПАВИКОМ путем их перекрестного сканирования в лабораториях Швейцарии и Италии;

- данными архивных документов об исследованных объектах культурного наследия;

- путем успешного распознавания с использованием авторского программного обеспечения визуально проверяемых элементов в ходе выполнения мюнографических работ.

Проведённые эксперименты убедительно демонстрируют, что авторские технические решения и методы обработки и анализа данных для мюнографических работ на основе эмульсионных трековых детекторов позволяют исследовать внутренние особенности структуры объектов природного и искусственного происхождения, не разрушая их, что открывает новые возможности, в том числе, для изучения и сохранения памятников культурного наследия. Мюнография имеет широкие внедренческие перспективы в области геологии, ядерной энергетики, вулканологии, дефектоскопии, археологии и других областях. Эффективный, экономичный и экологически безопасный метод может применяться, в частности, с целью создания систем мониторинга проблемных объектов для прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, для минимизации последствий возможных природных и техногенных катастроф для населения, инфраструктуры и окружающей среды.

Кроме применения в фундаментальной физике, разрабатываемые новые методики и решения для эмульсионных детекторов находят широкое применение и в социально значимых проектах. Актуальным является их использование при исследованиях внутренней структуры крупных природных, промышленных и археологических объектов методом мюнографии. Этот метод заключается в анализе поглощения потоков космических мюонов при их прохождении через изучаемый объект.

Представленная работа внесла значительный вклад в развитие актуального направления экспериментальной ядерной физики, связанного с исследованиями на базе эмульсионных детекторов и их высокотехнологичной обработкой на автоматизированных сканирующих комплексах.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту положения получены с определяющим вкладом автора. Автором разработана уникальная комплексная методика микроскопического анализа и контроля качества эмульсионных слоев в процессе восстановления её производства. Автором были созданы скрипты для сканирования и реконструкции треков с использованием внешних параметров и пакета FEDRA для экспериментов OPERA, SND@LHC, а также мюнографических экспериментов, что минимизирует «человеческий фактор» при реконструкции и автоматизирует данный процесс. Эти результаты автора по обработке и физическому анализу данных эксперимента OPERA на базе сканирующего комплекса ПАВИКОМ в настоящее время активно используется при обработке и анализе данных эксперимента SND@LHC.

Определяющий вклад автора в статье о работе в Даниловом монастыре [стр.201, 10] заключается в разработке конструкции детекторов и схемы их экспозиции, сканировании и анализе эмульсионных данных, выявлении скрытых неоднородностей в зданиях и на территории монастыря. Алгоритм проверки достоверности получаемых результатов путем распознавания визуально проверяемых элементов конкретного объекта исследования был разработан аспирантом Ж.Т. Садыковым (рукопись подготовленной к защите диссертации [стр.201, 11]), что также отражено как его соавторство в статье [стр.201, 10].

Таким образом, при определяющем вкладе автора выработаны общие методические подходы для конструирования мюнографических детекторов, определения их оптимальных условий экспозиции и проведена серия мюнографических экспериментов по исследованию памятников культурного наследия.

Основные положения, выносимые автором на защиту:

1. Методика исследования, тестирования и оптимизации характеристик ядерной фотоэмульсии в процессе восстановления ее производства в России для использования в экспериментах по поиску проявлений Новой физики.

2. Создание оригинальной конструкции ядерно-эмульсионных трековых детекторов, формулирование принципов организации ансамбля детекторов и их экспозиции, разработка новых алгоритмов анализа получаемых данных для мюнографии объектов культурного наследия.

3. Выявление новых особенностей внутренней структуры культурных объектов федерального значения - Свято-Троицкого Данилова и Свято-Успенского Псково-Печерского монастырей.

Апробация работы

- Результаты диссертации докладывались автором на международных и российских конференциях:

1. International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2015), Athens, Greece, “Muon Radiography in Russia with emulsion technique. First experiments and future perspectives”, March 20th - 23rd, 2015.
2. The 3rd International conference on particle physics and astrophysics (ICPPA), MEPhI, Moscow, “Application of the muon radiography method to study the structure of massive objects”, October 2^d – 5th, 2017.
3. ISCRA 2019, “Muonography of large natural and industrial objects”, June 25th, 2019.
4. XI Зацепинские чтения, ФИАН, Москва, “Исследование скрытых помещений Свято-Троицкого Данилова монастыря методом мюонной радиографии”, 28.05.2021.
5. ISCRA 2023, “A nuclear emulsion detectors for the muonography of underground structure of Holy Dormition Pskov-Caves Monastery”, 28.06.2023.

- На международных совещаниях по эмульсионной методике в лаборатории физики высоких энергий Бернского университета, Швейцария:
«Renewal of emulsion production in Russia», 19.11.2010; «Investigations on Emulsion Technique Base in LPI RAS and JINR», 25.11.2010; «Emulsion pouring and developing with using Slavich gel (on behalf of SLAVICH company)», 04.10.2011; «Results for different development conditions», 11.10.2011.

- На международных коллаборационных совещаниях эксперимента OPERA:
«Status of scanning Labs», 02.12.2010; «FEDRA@LASSO coupling», 12.11.2013; «Candidate 121230324048. Cross-check at Naples», 18.02.2013; «Scanning OPERA films with using LASSO», 25.02.2014; «Location and Decay Search», 31.05.2014; «Russian scanning laboratories: status report», 30.03.2016.

- На международных коллаборационных совещаниях эксперимента SND@LHC:
«Emulsion production and quality assessment», 08.10.2020; «Emulsion production at SLAVICH», 15.12.2020; «Emulsion production and quality assessment in Russia», 29.06.2021; «Emulsion production status and plans in Russia», 14.10.2021; «Status and plans for emulsion production in Russia», 16.03.2022; «Status of analysis in LPI», 14.06.2022; «Emulsion production in Russia», 03.10.2022; «Emulsion production in Russia for 2023. Report from Lebedev Scanning Laboratory», 12.12.2022; «Emulsion production in Russia for 2023», 04.09.2023; «SLAVICH emulsion data quality», 12.12.2023; «PAVICOM-3, PAVICOM-1 condition, LPI RAS», 05.03. 2024; «Data quality check and emulsion reconstruction with new algorithm of the first brick, RUN1», 22.11.2024.

- На многочисленных семинарах в российских научных организациях, в частности:

«Мюонная радиография крупных природных и промышленных объектов», 25.01.2022; «Мюонография в ЛЭЧ ФИАН», 21.03.2023; «Исследование объектов культурного наследия методом мюонографии -последние результаты и ближайшие планы», 10.10.2023 и др.

Публикации. Диссертация автора содержит работы, выполненные в период с 2010 по 2024 гг. Основные результаты диссертации опубликованы в 34 статьях в рецензируемых журналах:

1. Alexandrov A.B., Vladimirov M.S., Polukhina N.G., Starkov N.I., Shchedrina T.V. System for processing emulsion data of the OPERA experiment using the PAVICOM facility and prospects of its application to scan objects by muon radiography methods // Bull.Lebedev Phys.Inst. 2012. Vol. 39. P. 269–276.
2. OPERA collaboration, Shchedrina T. Determination of the energy measurement accuracy for charged particles by their range in nuclear photoemulsion // JINST. 2012. Vol. 39. P. 300–304.
3. Barabash A.S., Bradnova V.Y., Chernyavskiy M.M., Dubinina V.V., Egorenkova N.P., Konovalov S.I., Konovalova N.S., Polukhina N.G., Pozharova E.A., Shchedrina T.V., Smirnitsky V.A., Starkov N.I., Tan N.S., Umatov V.I. Determination of the energy measurement accuracy for charged particles by their range in nuclear photoemulsion // Bull.Lebedev Phys.Inst. 2012. Vol. 39. P. 300–304.
4. OPERA collaboration, Shchedrina T. Evidence for ν_μ to ν_τ appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment // Phys.Rev.D. 2014. Vol. 89, №5.
5. Alexandrov A., Bozza C., Buonauro A., Consiglio L., D'Ambrosio N., De Lellis G., De Serio M., Di Capua F., Di Crescenzo A., Di Ferdinando D., Di Marco N., Fini R.A., Galati G., Giacomelli G., Grella G., Hosseini B., Kose U., Shchedrina T., Simone S., Tioukov V. Improving the detection efficiency in nuclear emulsion trackers // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 2015. Vol. 776, № 45–49.
6. OPERA collaboration, Shchedrina T. Discovery of tau Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment // Phys.Rev.Lett. 2015. Vol. 12.
7. Aleksandrov A.B., Bagulya A.V., Chernyavskiy M.M., Galkin V.I., Dedenko L.G., Fomenko N.V., Konovalova N.S., De Lellis G., Managadze A.K., Orurk O.I., Polukhina N.G., Roganova T.M., Shchedrina T.V., Sirignano C., Starkov N.I., Tan N.S., Tioukov V.E., Vladimirov M.S., Zemskova S.G. Test Experiments on muon radiography with emulsion track detectors in Russia // Phys.Part.Nucl.Lett. 2015. Vol. 12, № 5. P. 713–719.
8. Alexandrov A., Buonauro A., Consiglio L., D'Ambrosio N., De Lellis G., Di Crescenzo A., Di Marco N., Galati G., Lauria A., Montesi M.C., Pupilli F., Shchedrina

- T., Tioukov V., Vladymyrov M. A new fast scanning system for the measurement of large angle tracks in nuclear emulsions // JINST. 2015. Vol. 10, № 11. P. 11006.
9. Alexandrov A.B., Bagulya A.V., Chernyavskiy M.M., Konovalova N.S., Managadze A.K., Orurk O.I., Polukhina N.G., Roganova T.M., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Tioukov V.E., Vladymyrov M.S., Zemskova S.G. Muon radiography in Russia with emulsion technique. First experiments future perspectives // AIP Conf.Proc. 2015. Vol. 1702, № 1. P. 110002.
 10. Alexandrov A.B., Vladymyrov M.S., Galkin V.I., Goncharova L.A., Grachev V.M., Vasina S.G., Konovalova N.S., Malovichko A.A., Okateva N.M., Polukhina N.G., Roganova T.M., Starkov N.I., Tioukov V.E., Chernyavskiy M.M., Shchedrina T.V. Muon radiography method for fundamental and applied research // Phys.Usp. 2017. Vol. 60, № 12. P. 1277–1293.
 11. OPERA collaboration, Shchedrina T. Final Results of the OPERA Experiment on nu tau Appearance in the CNGS Neutrino Beam // Phys.Rev.Lett. 2018. Vol. 21. P. 211801.
 12. Abiev A.K., Bagulya A.V., Chernyavskiy M.M., Dimitrenko A.A., Gadjiev A.K., Gadjiev M.S., Galkin V.I., Gippius A.A., Goncharova L.A., Grachev V.M., Konovalova N.S., Managadze A.K., Okateva N.M., Polukhina N.G., Roganova T.M., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Teymurov A.A., Tioukov V.E., Vasina S.G., Zarubin P.I. Muonography of Large Natural and Industrial Objects // Phys.Atom.Nucl. 2020. Vol. 82, № 6. P. 897–901.
 13. Alexandrov A.B., Vasina S.G., Galkin V.I., Goncharova L.A., Konovalov S.I., Konovalova N.S., Korolev P.S., Larionov A.A., Melnichenko I.A., Managadze A.K., Okateva N.M., Polukhina N.G., Roganova T.M., Sadykov Z.T., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Starkona E.N., Tioukov V.E., Chernyavskiy M.M., Shevchenko V.I. Search for Hidden Rooms in the Holy Trinity Danilov Monastery by the Muon Radiography Method // Phys.Atom.Nucl. 2021. Vol. 84, № 6. P. 855–859.
 14. Alexandrov A., Konovalova N., Okateva N., Polukhina N., Starkov N., Shchedrina T. Upgrade and new applications of the automated high-tech scanning facility PAVICOM for data processing of track detectors // Measurement. 2022. Vol. 187. P. 110244.
 15. Chernyavskiy M.M., Gippius A.A., Konovalova N.S., Malinin A.G., Okateva N.M., Petrov A.N., Polukhina N.G., Shchedrina T.V., Shevchenko V.I., Starkov N.I., Starkona E.N. High resolution track matching in a hybrid SciFi-emulsion detector // JINST. 2022. Vol. 17, № 02. P. 02002.
 16. SND@LHC collaboration, Shchedrina T. SND@LHC: the scattering and neutrino detector at the LHC // JINST. 2022. Vol. 19, № 05. P. 05067.
 17. Vasilev V.T., Konovalova N.S., Polukhina N.G., Sadykov Z.T., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Starkona E.N., Chernyavskiy M.M. Neural Networks for Processing Nuclear Emulsions // Phys.Atom.Nucl. 2023. Vol. 86, № 9. P. 2046–2050.
 18. Vasilev V.T., Konovalova N.S., Okateva N.M., Polukhina N.G., Sadykov Z.T.,

- Shchedrina T.V., Starkov N.I., Starkona E.N., Chernyavskiy M.M. Modernization of the Automated Scanning Complex for Data Processing of the SND@LHC Experiment // *Phys.Atom.Nucl.* 2023. Vol. 86, № 10. P. 2251–2255.
19. SND@LHC collaboration, Shchedrina T. Observation of Collider Muon Neutrinos with the SND@LHC Experiment // *Phys.Rev.Lett.* 2023. Vol. 131, № 3. P. 031802.
 20. Chernyavskiy M.M., Gippius A.A., Konovalova N.S., Okateva N.M., Polukhina N.G., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Starkona E.N. Simulation of the Response of a Hybrid Detector Based on Scintillation Optical Fibers and an Emulsion Chamber // *Bull.Lebedev Phys.Inst.* 2023. Vol. 50, № 8. P. 337–342.
 21. SND@LHC collaboration, Shchedrina T. Measurement of the muon flux at the SND@LHC experiment // *Eur.Phys.J.C.* 2024. Vol. 84, № 1. P. 90.
 22. Gorbunov S.A., Volkov A.E., Zhukov K.E., Konovalova N.S., Polukhina N.G., Shchedrina T.V., Starkov N.I. Track technique in present-day physics of atomic nuclei and elementary particles, astrophysics, and nanotechnology // *Phys.Usp.* 2024. Vol. 67, № 8. P. 779–802.
 23. SND@LHC collaboration, Shchedrina T. Results and Perspectives from the First Two Years of Neutrino Physics at the LHC by the SND@LHC Experiment // *Symmetry (Basel)*. 2024. Vol. 16, № 6. P. 702.
 24. Konovalova N.S., Okateva N.M., Polukhina N.G., Sadykov Z.T., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Starkona E.N., Chernyavskiy M.M. Investigation of High-Energy Neutrinos at the Large Hadron Collider // *Phys.Atom.Nucl.* 2024. Vol. 87, № 5. P. 594–603.
 25. SND@LHC collaboration, Shchedrina T. Observation of collider neutrinos without final state muons with the SND@LHC experiment // *Phys. Rev. Lett.* 2023. Vol. 131.
 26. Alexandrov A.B., Babaev P.A., Gippius A.A., Gorbunov S.A., Grachev V.M., Konovalova N.S., Krasilnikova Y.O., Larionov A.A., Managadze A.K., Melnichenko I.A., Okateva N.M., Paramonov S.S., Petrukhin A.A., Polukhina N.G., Roganova T.M., Sadykov Z.T., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Starkona E.N., Strekalina D.M., Tioukov V.E., Chernyavskiy M.M., Shevchenko V.I., Zainutdinov D.I., Volkov A.E. Muography Experiments in Russia with Emulsion-Based Detectors // *Phys. At. Nucl.* 2024. Vol. 87. P. 305–313.
 27. Abiev A., Bagulya A., Chernyavskiy M., Dashkina A., Dimitrenko A., Gadjiev A., Gadjiev M., Galkin V., Gippius A., Goncharova L., Grachev V., Konovalova N., Managadze A., Okateva N., Polukhina N., Roganova T., Shchedrina T., Starkov N., Teymurov A., Tioukov V., Vasina S., Zarubin P. Muon Radiography Method for Non-Invasive Probing an Archaeological Site in the Naryn-Kala Citadel // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9, № 10. P. 2040.
 28. Konovalova N.S., Konovalov A.S., Okateva N.M., Starkov N.I., Shchedrina T.V. Exploration of Underground Structures in the Holy Trinity Danilov Monastery by Muon Radiography Method // *Bull.Lebedev Phys.Inst.* 2021. Vol. 48, № 6. P. 175–180.

29. Alexandrov A.B., Vasina S.G., Galkin V.I., Grachev V.M., Konovalov A.S., Konovalova N.S., Korolev P.S., Larionov A.A., Managadze A.K., Melnichenko I.A., Okateva N.M., Polukhina N.G., Roganova T.M., Sadykov Z.T., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Starkona E.N., Tioukov V.E., Chernyavskiy M.M., Shevchenko V.I. Muon Radiography of Large Natural and Industrial Objects-A New Stage in the Nuclear Emulsion Technique // J. Exp. Theor. Phys. 2022. Vol. 134, № 4. P. 506–510.
30. Shchedrina T.V., Konovalova N.S., Starkov N.I. Aging of the Nuclear Photographic Emulsion under Various Conditions // Bull.Lebedev Phys.Inst. 2022. Vol. 49, № 8. P. 235–241.
31. Alexandrov A.B., Vasina S.G., Galkin V.I., Gippius A.A., Grachev V.M., Kalinina G.V., Konovalov A.S., Konovalova N.S., Larionov A.A., Managadze A.K., Melnichenko I.A., Okateva N.M., Polukhina N.G., Sadykov Z.T., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Starkona E.N., Tioukov V.E., Chernyavskiy M.M., Shevchenko V.I. A Noninvasive Muonography-Based Method for Exploration of Cultural Heritage Objects // Phys. Part. Nucl. 2022. Vol. 53, № 6. P. 1146–1175.
32. Shchedrina T.V., Vasina S.G., Starkov N.I., Polukhina N.G. Results of the Test Experiment on Optimization of the Number of Emulsion Layers in Modern Nuclear Studies with Track Detectors // Bull.Lebedev Phys.Inst. 2022. Vol. 49, № 12. P. 429–435.
33. Alexandrov A.B., Anokhina A.M., Vasina S.G., Gippius A.A., Gorbunov S.A., Grachev V.M., Konovalova N.S., Krasilnikova Y.O., Larionov A.A., Managadze A.K., Melnichenko I.A., Okateva N.M., Paramonov S.S., Petrukhin A.A., Polukhina N.G., Roganova T.M., Sadykov Z.T., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Starkona E.N., Tioukov V.E., Chernyavskiy M.M., Shevchenko V.I. Muography of the Cave Church of the Holy Dormition Pskovo-Pechersky Monastery // Bull.Lebedev Phys.Inst. 2023. Vol. 50, № 12. P. 603–611.
34. Alexandrov A.B., Anokhina A.M., Vasina S.G., Gippius A.A., Gorbunov S.A., Grachev V.M., Konovalova N.S., Krasilnikova Y.O., Larionov A.A., Managadze A.K., Melnichenko I.A., Okateva N.M., Paramonov S.S., Petrukhin A.A., Polukhina N.G., Roganova T.M., Sadykov Z.T., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Starkona E.N., Tioukov V.E., Chernyavskiy M.M., Shevchenko V.I. Principles of Data Processing of the Muographic Experiment in the Cave Complex of Pskovo-Pechersky Monastery // Phys.Atom.Nucl. 2024. Vol. 87, № 6. P. 718–731.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы, содержащего 124 наименования. Работа изложена на 213 страницах машинописного текста, включающих 148 рисунков и 10 таблиц.

Список используемых в диссертации сокращений:

ЯФ – ядерная фотоэмульсия;

МТ – микротрек, проходящий через верхний или нижний слой двухсторонней фотоэмульсии;

БТ – базовый трек, проходящий через весь эмульсионный слой;

ОТ – объемный трек, проходящий через весь детектор;

OPERA - Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus;

SND@LHC – Scattering Neutrino Detector at the Large Hadron Collider;

CHORUS – CERN Hybrid Oscillation Research apparatus;

ЦЕРН – Европейский центр ядерных исследований (от фр. Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire);

DONuT - Direct Observation of the Nu Tau;

ПАВИКОМ – Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс;

ЛЭЧ ОЯФА ФИАН – Лаборатория элементарных частиц Отделения ядерной физики и астрофизики Физического института им. П.Н. Лебедева РАН;

ОИЯИ – Объединенный институт ядерных исследований;

Грейн – проявленное зерно фотоэмульсии;

ТАЦ – триацетатная основа;

сс – единица объема, см³ (от англ. cubic centimeter);

ТД – трековый детектор;

ПО – программное обеспечение;

Чипсет - набор микросхем (от англ. chipset);

LASSO – Large Angle Scanning System for OPERA;

FEDRA - Framework for Emulsion Data Reconstruction and Analysis;

GEANT4- GEometry ANd Tracking, 4th edition;

ROOT – открытый исходный код, разработанный в ЦЕРН (CERN) для обработки и анализа больших объёмов данных, не является аббревиатурой;

MC – Monte Carlo;

БАК – Большой адронный коллайдер;

ECC – Emulsion Cloud Chamber;

SciFi - Scintillation Fiber;

ЦПБМ – Церковь Похвалы Божьей Матери;

БТИ – Бюро технической инвентаризации;

ЦВС – Церковь Всех Святых.

Глава 1. Восстановление производства фотографической эмульсии в России

1.1 Производство ядерной фотоэмульсии для научных исследований

Фотоэмульсии как трековые детекторы успешно используются в ядерно-физических исследованиях с 1896 года (пионерская работа нобелевского лауреата Беккереля), оставаясь до сих пор при столь почтенном возрасте детекторами с непревзойденным самым высоким пространственным разрешением. В современной физике все преимущества и достоинства эмульсионной методики активно используются и развиваются, благодаря инновационным технологиям обработки данных.

Фотоэмульсионные трековые детекторы широко используются в экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий. Столь продолжительная жизнь методики, безусловно, связана с уникальным пространственным разрешением и возможностью идентификации треков частиц. Одним из основных их достоинств является наглядность и достоверность регистрации пространственной картины взаимодействия частиц. В развитии ядерной физики эти трековые детекторы сыграли выдающуюся роль, что подтверждается, в частности, несколькими Нобелевскими премиями: Беккерель (1903 год, открытие естественной радиоактивности), Гесс (1936 год, открытие космических лучей с аппаратурой, включающей фотопластинки), Пауэлл (1950 год, за разработку фотографического метода исследования ядерных процессов и открытие мезонов).

В 1910 году С. Киношита использовал фотоэмульсии для регистрации следов заряженных частиц и показал, что зёрна бромистого серебра, встречающиеся на пути α -частицы, становятся способными к проявлению [12]. В 1930-х – 1940-х годах благодаря группе под руководством Пауэлла из Бристольского университета (Англия) эмульсионная технология значительно усовершенствовалась, были разработаны так называемые ядерные фотоэмульсии (ЯФ), производство Ильфорд и Кодак [13], отличающиеся от обычных большей толщиной, до 1200 микрон, а также высокой однородностью микрокристаллов и

повышенной концентрацией галогенида серебра, достигающей 85%. Спустя пару десятилетий были получены фотоэмульсии, чувствительные ко всем заряженным частицам и дальнейшее их усовершенствование велось в направлении увеличения чувствительности с целью обеспечения возможности регистрации следов частиц высоких энергий. В 1950-е – 1960-е годы активно развиваются различные технологии изготовления и процесса проявки ядерных фотоэмульсий, что делает ядерные фотоэмульсии востребованными и открывает новую страницу в физике космических лучей, элементарных частиц и в физике высоких энергий [14–18]. Ядерные фотоэмульсии производили различные промышленные компании: Ильфорд (Англия), Истмен-Кодак (США), Геверт (Бельгия), Фуджи (Япония), ОРВО (ГДР), ГОСНИИХИМФОТОПРОЕКТ (СССР). В 1960-е – 1980-е году были предложены и успешно реализованы первые аэростатные эксперименты, использующие значительные объемы ЯФ: MUBEE (Moscow University Ballon Experiment), JACEE [19,20] для прямых измерений космических лучей. Однако дальнейшего развития подобные эксперименты не получили по причине технических ограничений методики обработки: поиск треков в ядерной фотоэмульсии и измерения их характеристик проводились оператором на оптических микроскопах вручную, что требовало огромных затрат труда и времени, а скорость измерений при этом оказывалась невысокой, что определяло низкую статистику обработанных событий. Кроме того, при таких измерениях была достаточно велика вероятность появления ошибок, связанных с человеческим фактором. В результате в течение нескольких десятилетий эмульсионная методика использовалась в относительно небольших экспериментах, в которых за период порядка нескольких месяцев, включающих в себя: экспозицию, обработку, а также “визуальный” режим просмотра эмульсионных слоев, можно было получить физический результат, например, 1978-1983 Fermilab E531, использовали ~100 кг эмульсии, физика очарованных частиц, поиск осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Поэтому спрос на фотоматериалы сократился, и большая часть предприятий закрыла их производство.

Однако, благодаря развитию производства прецизионной и вычислительной техники и успешных аппаратурных разработок физиков, появились автоматические сканирующие оптические микроскопы и стала возможной реализация экспериментов, использующих десятки и даже сотни тысяч квадратных метров ядерной фотоэмульсии:

1990-2000 ЦЕРН WA95, CHORUS ~ 1 тонна, поиск осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, физика очарованных частиц [21,22];

1994-2001 Fermilab E872 DONuT ~ 1 тонна, первое наблюдение ν_τ [23];

2008- 2015 ЦЕРН CNGS01 OPERA ~ 1250 тонн, первый осцилляционный эксперимент «на появление» - прямое наблюдение и исследование $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ осцилляций, исследование $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций [24,25].

В мире из всех компаний - производителей в начале 2000 осталась единственная компания Фуджи, которая, в частности, изготовила ядерную фотоэмульсию для эксперимента OPERA (общая площадь произведенной фотоэмульсии составила примерно восемь футбольных полей). Однако после этого, при отсутствии большого заказа ядерной фотоэмульсии, сопоставимого с экспериментом OPERA, производство фотоэмульсии Фуджи было свернуто. В 2010-х годах на мировом рынке появились два производителя, задачей которых стало восстановление производства ЯФ для научных исследований: университет Нагойя, Япония и ООО “СЛАВИЧ”, Переславль-Залесский, Россия.

СЛАВИЧ. Изготовление ядерной фотоэмульсии- довольно сложный технологический процесс коллоидной химии, который требует наличия специализированного оборудования, помещений, уникальной рецептуры и т.п., но самое главное – высококвалифицированных узкопрофильных специалистов, способных воспроизвести уникальную технологию производства. Компания ООО “СЛАВИЧ” была создана в 1931 году, когда в городе Переславле-Залесском вступила в строй первая в СССР фабрика киноплёнки. В 1970 году это уже одно из крупнейших производств фотобумаги, магнитных лент и фотопластинок. В

настоящее время в структуру ООО “СЛАВИЧ” входят 7 заводов - производителей промышленной продукции, обеспечивающих 90% общероссийского объема выпуска всей фотохимической продукции. Задачу восстановления утраченной в России технологии производства ядерной фотоэмульсии для научных исследований взяли на себя инженеры-технологи и химики ООО “СЛАВИЧ” в 2008 г. Перед специалистами стояла задача воспроизвести производство близкой к уникальной рецептуре ГОСНИИХИМФОТОПРОЕКТ фотоэмульсии типа БР-2, химический состав которой приведен в таблице 1.1.

Элемент	^1H	^{12}C	^{14}N	^{16}O	^{80}Br	^{108}Ar
Атом/ $\text{см}^3 \times 10^{22}$	3,150	1,410	0,395	0,956	1,028	1,028

Таблица 1.1 Химический состав ядерной фотоэмульсии БР-2.

Восстановление производства ЯФ специалистами ООО “СЛАВИЧ” происходило в тесном сотрудничестве с физиками ЛЭЧ ОЯФА ФИАН (г. Москва) и химиками ОИЯИ (г. Дубна, Московская обл.), имеющими многолетний опыт работы в эмульсионных экспериментах в России и в международных коллаборациях. Были разработаны и согласованы новые технические требования, которым должна удовлетворять ЯФ:

1. Средняя чувствительность (число зерен на 100 мкм длины релятивистской однозарядной частицы): 30-35 зерен. Чувствительность должна сохраняться на уровне 90% от начальной в течение одного года. Отклонение от средней чувствительности по глубине слоя 4–5 %. Отклонение от средней чувствительности в партии: 4%. Отклонение от средней чувствительности от партии к партии: 5 %.
2. Политая с двух сторон на триацетатцеллюлозную (ТАЦ) основу эмульсия должна иметь следующие технические характеристики: толщина эмульсионного слоя при поливе: 50 ± 5 мкм, база (пластик): 175 мкм, наиболее востребованные («ОПЕРНЫЕ») размеры эмульсионного слоя: 100 мм $\times$ 125 мм. По согласованию

заказчика с изготовителем возможен выпуск эмульсионных слоев других размеров.

3. Условия производства в темной комнате: температура $\sim 20^{\circ}\text{C}$; влажность $\sim 40\text{--}50\%$.

4. Эмульсионный слой после химико-фотографической обработки не должен отставать от основы.

5. Ровность эмульсионного слоя после сушки (радиус изгиба пластины): менее 1 мм.

6. Объемная вуаль (число зерен вуали в объеме 10^3 мкм^3): 3.0–4.0;

7. Средний диаметр проявленного зерна: $0.5 \pm 0.2\text{ мкм}$;

8. Габитус проявленного зерна – сфера;

9. Регрессия скрытого изображения (зависимость потери чувствительности от времени хранения облученной эмульсии) при температуре 20° и влажности 60%: 12 % - 15% в течение года. Эмульсионные слои не должны иметь дихроической (цветной) вуали, пузырей, черных и белых точек, различных “грязевых” включений, царапин и других дефектов, влияющих на качество изображения следов релятивистских частиц.

10. ЯФ производства ООО “СЛАВИЧ” имеет химический состав, отличающийся на 2-3% от российской эмульсии БР-2.

11. Каждая производимая партия должна сопровождаться проявленным контрольным тестовым образцом, размером 100 мм $\times$ 125 мм для микроскопической оценки качества продукции.

12. Упаковочный пакет каждой партии должен содержать информацию о дате синтеза и полива эмульсионного слоя, толщине политого слоя до проявки, толщине ТАЦ, размере и количестве фотоэмульсионных слоев в упаковке на русском и английском языках.

13. Для транспортировки эмульсия должна быть упакована в свето- и водонепроницаемые пакеты, жестко зафиксированные ровной поверхностью с обеих сторон упаковки во избежание механической деформации слоев во время транспортировки.

Первый год (2008) восстановления технологии и испытаний почти полностью был посвящен подбору и испытаниям желатина различных производителей: PB Gelatin (Бельгия), GELITA (Германия), Rousselot (Франция), Nitta Gelatin (Япония), Eastman Gelatine Corporation (США), JSC Mojelit (Белоруссия). Всего за этот период было произведено и протестировано 32 синтеза ядерной фотоэмульсии на основе материала от различных производителей желатина. В течение следующих двух лет, 2010-2011 годов, велись активные разработки усовершенствования методики изготовления эмульсионного геля: от стандартизации формы и размера эмульсионных микрокристаллов до различных способов синтеза эмульсии (сепарирование или осаждение), механизма полива на подложку и рецептуры проявки фотоэмульсий. Научная группа ФИАН, при определяющем вкладе автора в течение всего периода восстановления производства ядерной фотоэмульсии проводили экспертную микроскопическую оценку используемых материалов и тестовых образцов. Только совместная работа инженеров-технологов, химиков и физиков позволила не только восстановить технологию производства ЯФ в России, но и коррекции отдельных её характеристик в рамках конкретной задачи (толщина эмульсионного слоя, размер эмульсионной пластины, размер проявленного зерна, чувствительность и т.п.). Для примера приведена оценка равномерности химической проявки тестовых эмульсионных слоёв с использованием различных проявителей при различных условиях, см. таблицу 1.2 - 1.3. Для оценки качества проявки и некоторых ее технических характеристик тестовые образцы были отсканированы на сканирующем комплексе ПАВИКОМ [26–29]. По результатам сканирования проведена реконструкция грейнов: компьютерное представление зерен кристаллического серебра в эмульсии в каждом отдельном эмульсионном

слое. На рисунках 1.1-1.2 представлены распределения по реконструированным грейнам на отсканированной площади 1 см² при различных методах проявки эмульсионных образцов.

Стадия	Длительность, минуты	Раствор - состав	Количество
1. Проявитель	18	Проявитель FUJI Демин. вода Стартер FUJI	250 cc 750 cc 20 cc
2. Стоп ванна	10	Уксусная кислота Демин. вода	5 cc 1 литр
3. Промывка	10	Вода	1 литр = 1 литру демин. воды
4. Фиксирование с перемешиванием	60 + 20	Фиксаж FUJI Вода	750 cc 750 cc
5. Промывка с перемешиванием	120	Вода	ёмкость с проточной водой, полностью покрывающая кюветы с эмульсионными слоями
6. Сушка	не менее 24 часов		

Таблица 1.2 Стадии проявки фотоэмульсионных слоёв СЛАВИЧ с использованием проявителя №1, амидоловый. Температура водных растворов на всех стадиях химической проявки 19,8⁰ С.

Стадия	Длительность, минуты	Температура ⁰ С
1. Проявление в проявителе Д-19, разведенного обессоленной водой 1:4 (1часть проявителя и 4 части воды)	20	20
2. Ополаскивание в обессоленной воде	2	комнатная
3. Фиксирование в фиксаже БКФ	от 1 ч до полного осветления	комнатная
4. Промывка проточной обессоленной водой	60	комнатная
5. Сушка	До полного высыхания	комнатная

Таблица 1.3 Стадии проявки фотоэмульсионных слоёв СЛАВИЧ с использованием проявителя №2, Д-19. Температура водных растворов на всех стадиях химической проявки 20,0⁰ С.

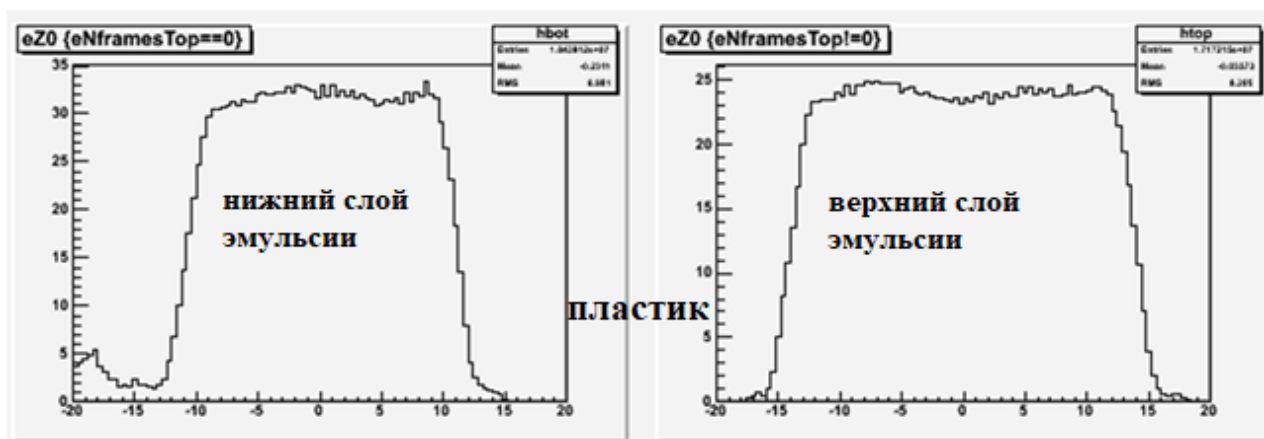


Рисунок 1.1 Распределение по числу реконструированных грейнов при проявке проявителем №1.

Из представленных на рис.1.1 и рис.1.2 данных следует, что при химической проявке проявителем №1 (амидоловый), распределение грейнов на всей площади эмульсионного слоя равномерно, что означает, что раствор проявителя равномерно проник в объем проявляемого образца. На рис.1.2 напротив, отчетливо виден спад числа реконструированных грейнов у пластиковой основы проявляемого образца, что означает недопроявку исследуемого образца. Следовательно, данная рецептура нуждалась в некоторой модификации с целью оптимального подбора параметров: время, температура, состав и концентрация раствора.

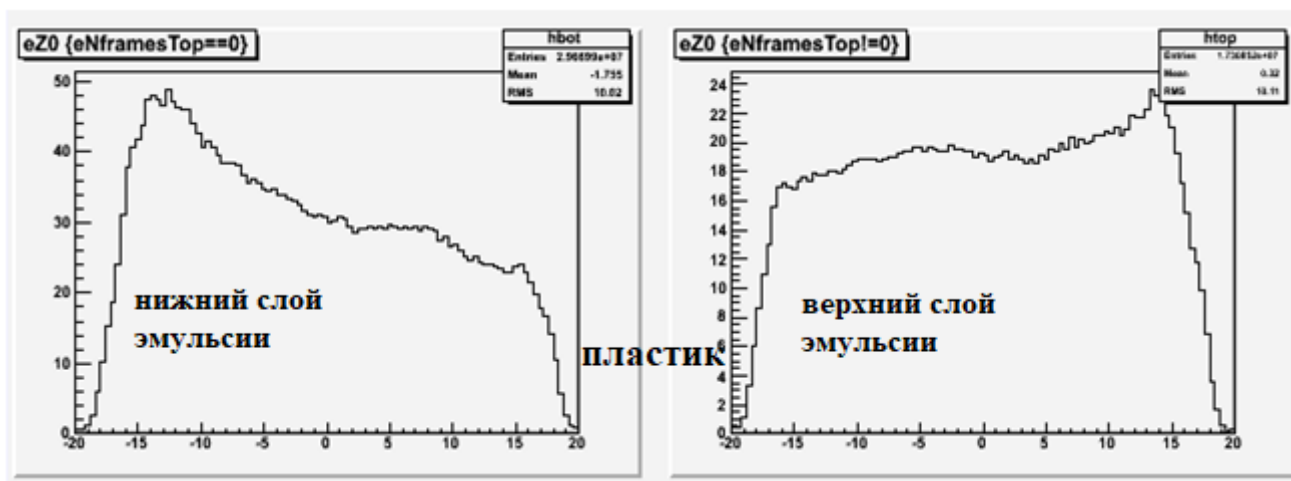


Рисунок 1.2 Распределение по числу реконструированных грейнов при проявке проявителем №2.

На рисунках 1.3 и 1.4 представлены распределения реконструированных треков, проходящих через обе поверхности (top, bottom) эмульсионного слоя. Реконструкция треков проводилась на отсканированной площади 1 см^2 каждого из испытываемых образцов. Для примера выбраны два образца: проявитель №1 и №2 (D-19).

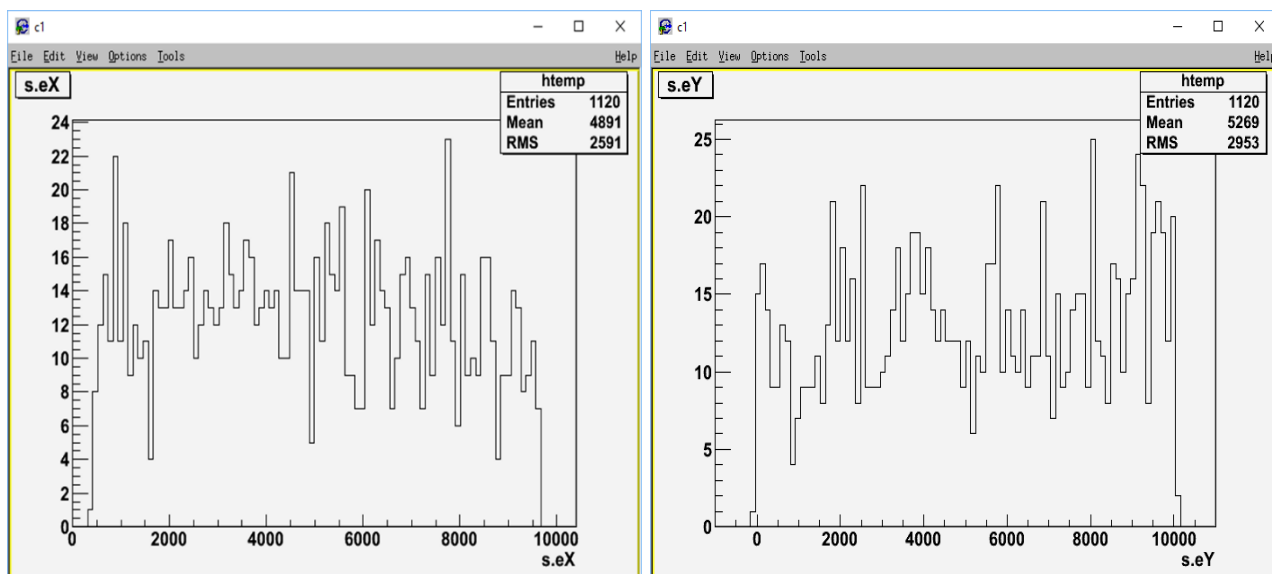


Рисунок 1.3 Распределение по координатам X, Y реконструированных треков при проявке проявителем №1.

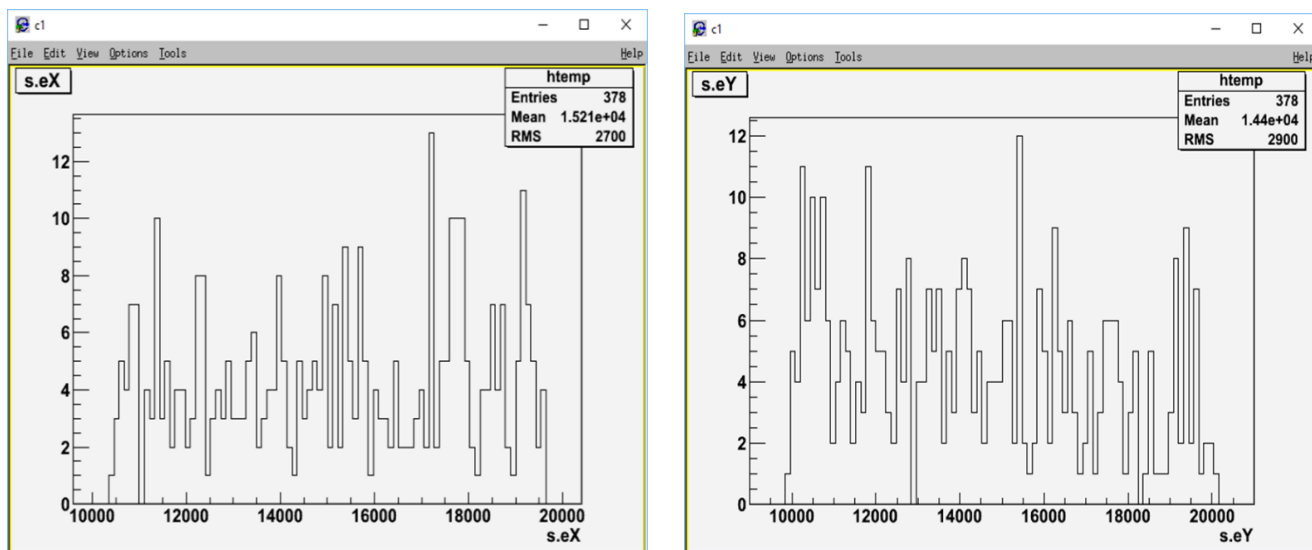


Рисунок 1.4 Распределение по координатам X, Y реконструированных треков при проявке проявителем №2.

Из представленных на рисунках 1.3 и 1.4 полученных автором на комплексе ПАВИКОМ распределений видно, что на идентичных эмульсионных образцах, проявленных разными способами, на единицу площади

реконструировано 1120 треков и 378 треков соответственно. Т.е. недопроявка образца ведет к тому, что часть грейнов не могут быть реконструированы, и как следствие, теряется значительная часть данных при реконструкции треков.

Первые промышленные образцы, соответствующие мировым стандартам, благодаря комплексу реализованных химико-технологических разработок появляются на производстве ООО “СЛАВИЧ” уже в 2012 году. В настоящее время ЯФ для научных исследований выпускается в трёх основных видах: фотопластинки на стеклянной подложке различных форматов с толщиной сухого слоя эмульсии от 50 до 200 мкм, фотоплёнки листовые различных форматов с одним и двухсторонним слоем эмульсии с толщиной слоёв до 50 мкм, бесподложечные сухие пластины (эмульсия-гель) различных форматов с толщиной сухого слоя 500-600 мкм. При необходимости продукция может комплектоваться набором химических реактивов для химико-фотографической обработки. На рисунках 1.5-1.8 представлены фото, отражающие различные стадии производства ЯФ в России.



Рисунок 1.5 а) Готовый эмульсионный гель; б) эмульсионный гель, политый на стеклянную основу. Фото сделано в тёмной комнате при помощи инфракрасной фотокамеры.



а)

б)

Рисунок 1.6 Фотографии в цехах ООО “СЛАВИЧ”. а) – оборудование для производства ЯФ путем сепарирования; б) несколько участников процесса восстановления производства в цехе синтеза эмульсионного геля, слева направо- руководитель производства ЯФ Ю.А. Березкина, к.ф.-м.н. Т.В. Щедрина, инженер ЛЭЧ ФИАН В.Э.Тюков.



а)

б)

Рисунок 1.7 а) Вакуумные столы для ручного полива ЯФ на подложку на производстве ООО “СЛАВИЧ”; б). несколько участников процесса восстановления производства в перед камерой обдува для входа в цех полива эмульсионного геля, слева направо: инженер производства ЯФ Г.А. Алексеева, к.ф.-м.н. Т.В. Щедрина, профессор Джованни де Леллис, руководитель производства ЯФ Ю.А. Березкина, д.ф.-м.н. Н.Г. Полухина.



Рисунок 1.8 Резка литой пленки /стекло/ на различные форматы, упаковка (слева) и внешний вид готовой продукции (справа) на производстве ООО “СЛАВИЧ”.

С 2020 года ООО “СЛАВИЧ” вышел на мощность 100 м² ЯФ в год со стабильным качеством выпускаемой продукции, а ее потребителями стали не только российские научно-исследовательские центры и институты, но и международные организации, такие как Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария) и Неапольская Лаборатория Национального института ядерной физики Италии.

Университет Нагойя, Япония. В 2010 году сотрудниками университета Нагойя, Япония, под руководством бывшего сотрудника компании ФУДЖИ, который был зачислен в штат университета и полностью владел технологией производства различных видов ЯФ, началось восстановление технологии производства ЯФ в одной из лабораторий университета. До 2020 года включительно в лаборатории осуществлялся ручной полив, см. рисунок 1.9, и производственная мощность составляла 100 м² ЯФ в год [30].



Рисунок 1.9 Вакуумный стол для ручного полива ЯФ на ТАЦ подложку в лаборатории университета Нагойя, Япония.

Высокий спрос на производство ЯФ в Японии обусловлен большим числом, прежде всего, японских экспериментов с её использованием, как в фундаментальных: GRAINE, NINJA, DsTau, FASER и SND@LHC (ЦЕРН) [31], так и в прикладных работах (мюонография, медицинские приложения при работе на ускорителях, климатические исследования и др.). В 2019-2020 годах сотрудники университета Нагойя приступают к оборудованию специальных помещений, разработке машины для автоматического полива геля на ТАЦ основу. Первые тесты работы автоматической поливной машины были

выполнены в 2020 году, а с 2021 года сотрудники университета Нагойя переходят от ручного полива к промышленному автоматическому поливу эмульсионного геля на ТАЦ основу. На рисунках 1.10 – 1.12 представлены внешний вид машины для производства эмульсионного геля осаждением, поливной машины и пример полива эмульсионного геля на одну из сторон ТАЦ.



Рисунок 1.10 Внешний вид машины в университете Нагойи для производства эмульсионного геля путем осаждения.



Рисунок 1.11 Внешний вид автоматической поливной машины эмульсионного геля на ТАЦ подложку в университете Нагойи.



Рисунок 1.12 Пример полива автоматической поливной машиной эмульсионного геля на одну из сторон ТАЦ подложки в университете Нагойи.

Рецептура производства эмульсионного геля и технические детали являются коммерческой тайной, публикации или техническая документация по данной тематике отсутствуют. Представленные в работе материалы позаимствованы из материалов докладов на совещаниях коллаборации SND@LHC (ЦЕРН, 2021-2024 гг) о результатах модернизации и планах по производству эмульсии в Японии (1st – 20th SND@LHC Collaboration meetings [32]). К 2023 году производство ЯФ в автоматическом режиме в университете Нагойи достигло 500 м² ЯФ в год.

1.2 Оценка качества российской фотографической эмульсии

Для оценки качества производимой российской продукции была разработана методика визуального и микроскопического контроля производимой продукции при значительном вкладе автора в разработку методологии и интерпретации полученных результатов [33–35].

На всех стадиях производства ядерной фотографической эмульсии отбирается контрольный образец из каждой новой партии. Так на этапе полива на непроявленном образце в условиях чистой темной комнаты производится контроль температуры и влажности в помещении полива, сушки; осуществляется визуальный осмотр непроявленного образца на предмет каких-либо дефектов, механической деформации слоя; выполняются измерения толщины полива в нескольких точках эмульсионного слоя по всей поверхности

образца с помощью микрометра для оценки равномерности полива проявленного образца.

Каждая партия, произведенная ООО “СЛАВИЧ”, сопровождается также проявленным тестовым образцом размером 10 мм×12,5 мм для оценки качества продукции. Визуально у проявленного тестового образца оценивается прозрачность эмульсионного слоя, отсутствие дихроической (цветной) вуали, пузырей, черных и белых точек, различных “грязевых” включений, царапин и других дефектов, влияющих на качество изображения следов релятивистских частиц. Фото одного из таких тестовых образцов представлено на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 Внешний вид проявленного тестового образца российской ядерной фотоэмульсии.

Микроскопическая оценка качества тестовых образцов ядерной фотоэмульсии производится с использованием высокотехнологической прецизионной техники - сканирующего комплекса ПАВИКОМ, ФИАН, Москва. Данный вид оценки качества включает в себя проверку равномерности полива, распределения зерен в объеме эмульсионного слоя и количественную оценку объемной вуали (число проявленных зерен в 1 мкм³). На рисунке 1.14 представлено двумерное распределение, отображающее равномерность полива эмульсионного геля на пленку в одной из 9-ти измеренных точек на всей поверхности эмульсии. Из рисунка видно, что разброс по величине толщины эмульсии невелик - 3–4 мкм (на рисунке 1.14 показан как градиент красно-оранжевого цвета). В каждом из девяти измерений сканировалась площадь 5000 x 10000 мкм² на сканирующем комплексе ПАВИКОМ.

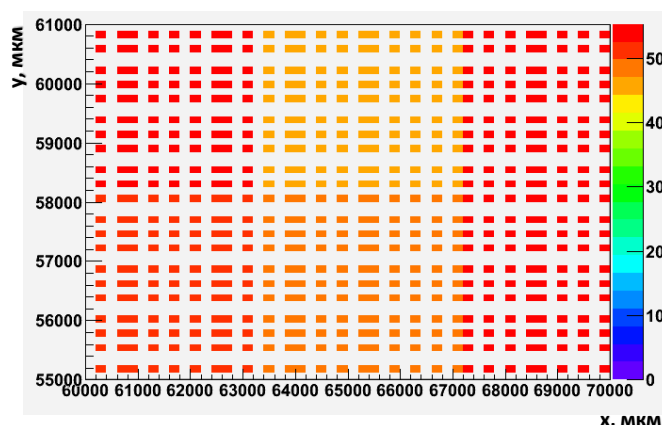


Рисунок 1.14 Двумерная гистограмма, отображающая равномерность полива эмульсионного геля на пленку. Разброс по величине толщины эмульсионного слоя, составила (50 ± 3) мкм.

Фото одного поля зрения (600×800 мкм) проявленного сразу после полива эмульсионного образца одной из произведенных СЛАВИЧЕМ партий 2023 года представлено на рисунке 1.15. Синтез эмульсионного геля был произведен 6-19 января 2023 г.; полив фотоэмульсии: 23-24 января 2023.

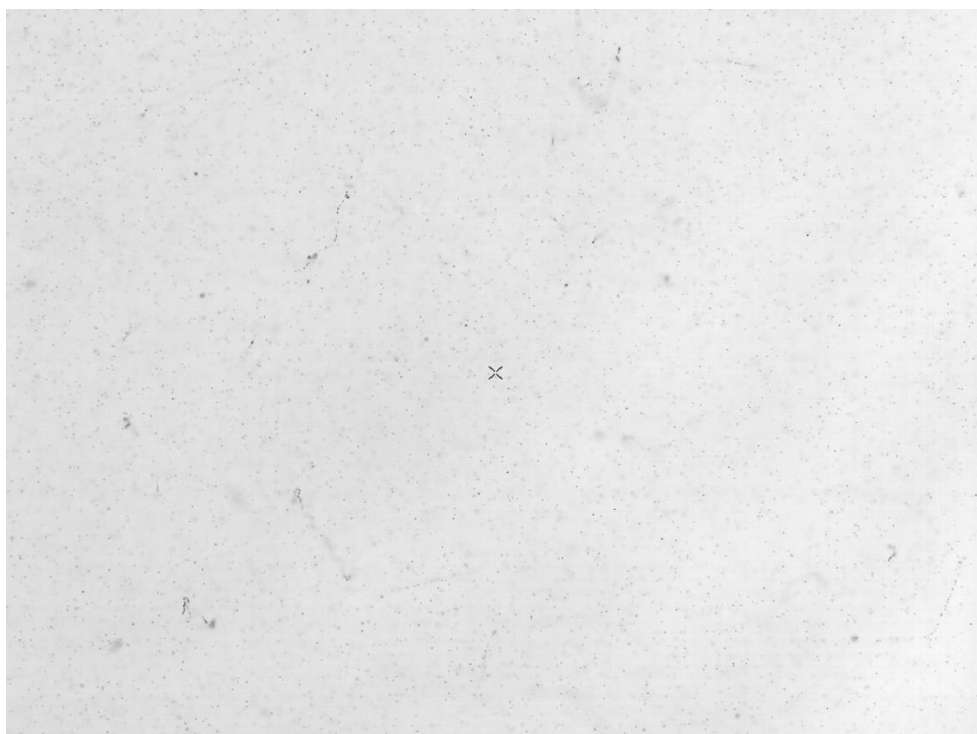


Рисунок 1.15 Фото одного поля зрения 600×800 мкм эмульсионного слоя. Фото сделано на сканирующем комплексе ПАВИКОМ с 20-кратным увеличением.

Рисунок 1.16 демонстрирует измеренное распределение зерен в объеме эмульсионного слоя или так называемую величину объемной вуали, которая не должна превышать 4-5 зёрен на 1000 мкм^3 .

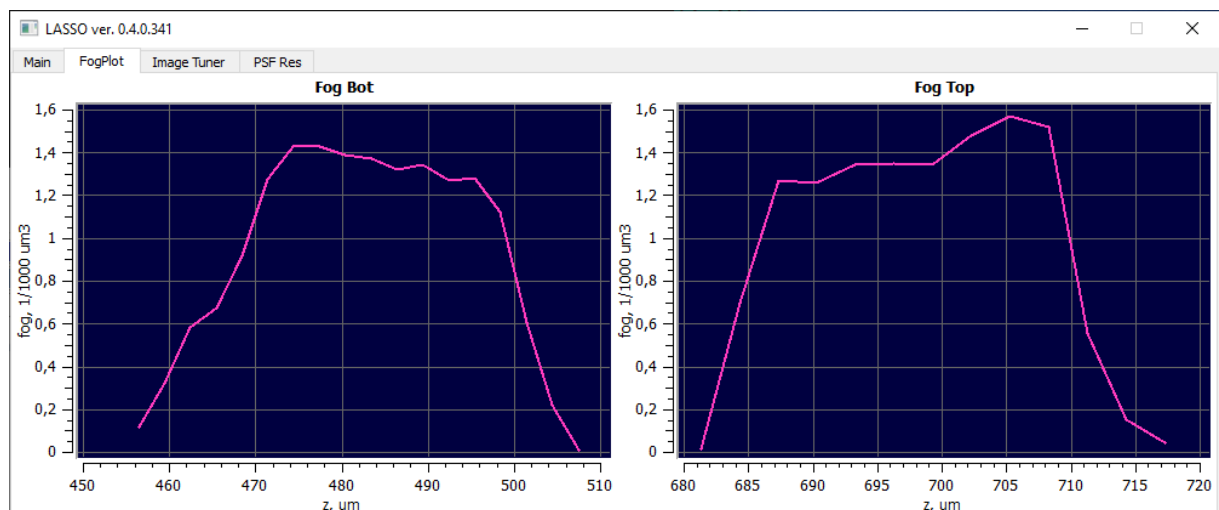


Рисунок 1.16 Количество зёрен, распределенных в объёме эмульсионного слоя для нижнего и верхнего слоя соответственно.

Из рисунка 1.16 отчетливо видно, что объемная вуаль не превышает значения 1,6 на единицу объема и одинакова для верхнего и нижнего слоёв.

Для оценки чувствительности ядерной фотоэмульсии необходимо облучение высокоэнергетическими однозарядными частицами. Пример одного из таких облучений представлен на рисунках 1.17 – 1.18. В Европейском центре по ядерным исследованиям ЦЕРН было выполнено облучение одного из эмульсионных образцов, политого автором вручную на стеклянную пластинку в ЦЕРНе, непосредственно перед экспозицией горизонтальным пучком π -мезонов с энергией 10 ГэВ (см. рис. 1.17).

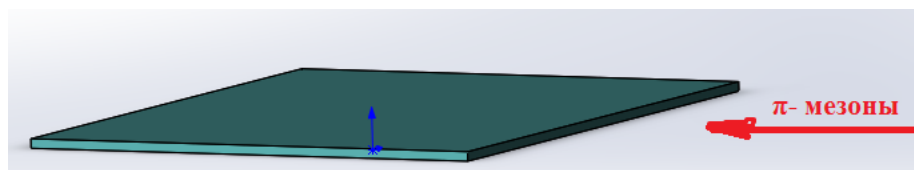


Рисунок 1.17 Схема облучения фотоядерной пластинки.

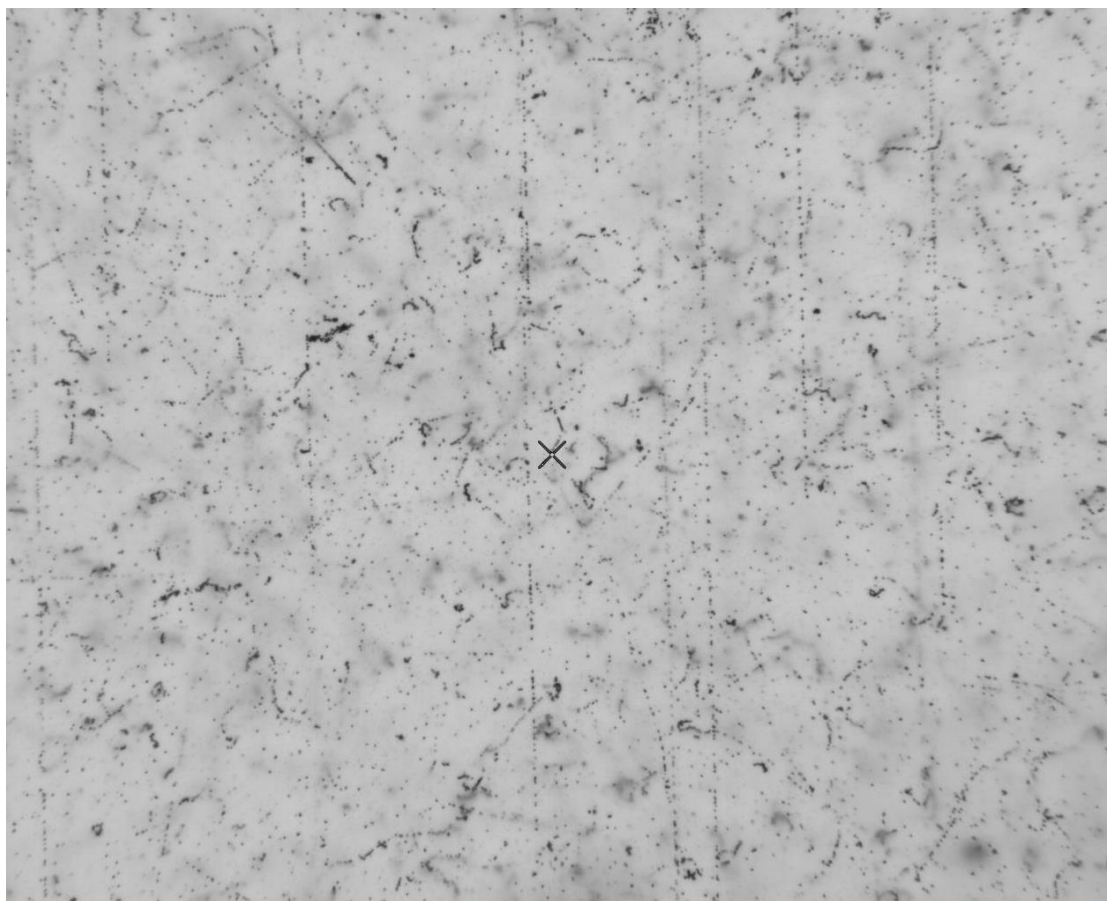


Рисунок 1.18 Фотография следов π -мезонов в образце, размер изображения 380x310 мкм.

Проводилась микроскопическая оценка чувствительности эмульсии к однозарядным минимально ионизирующим частицам (MIP). Согласно экспериментальным результатам, представленным на рисунке 1.18, число зерен в проявленном образце составило 35 ± 3 на 100 мкм длины трека MIP.

Вышеописанным методом производится оценка тестовых эмульсионных образцов для каждой новой партии ядерной фотоэмульсии; выполняется качественный и количественный контроль произведенной продукции. В таблице 1.4 приведен пример авторского технического задания (спецификации) на производство фотографической эмульсии для использования на ускорителе ЦЕРН в рамках международного эксперимента SND@LHC (Scattering Neutrino Detector at LHC). Таким образом, разработанная автором методика мониторинга качества российской эмульсии позволила восстановить ее производство на мировом уровне и обеспечила выход российской эмульсии на международный рынок.

Требования к качеству, техническим характеристикам, функциональным свойствам ядерной фотографической эмульсии

1. Чувствительность – число зерен на 100 мкм длины релятивистской однозарядной частицы: 30-35 зерен. Чувствительность должна сохраняться на уровне 90% от начальной в течение одного года;
 2. Политая с двух сторон на ТАЦ основу эмульсия должна иметь следующие технические характеристики, соответствующие геометрическим размерам детектора SND:
 - а) толщина эмульсионного слоя при поливе = 50 мкм;
база (пластик)= 175 мкм;
равномерность ручного полива= 10 мкм.
 - б) Размеры эмульсионного слоя: 191.5 ± 0.3 мм. СТРОГО МЕНЬШЕ 192 мм!
Разброс геометрического размера пластин друг относительно друга не должен превышать 0.6 мм.
 - в) Параметры эмульсионного слоя в темной комнате при производстве: температура= 20^0 С; влажность = 40-50 %;
Ровность эмульсионного слоя после сушки (радиус изгиба пластины): менее 1 мм.
 3. Отклонение от средней чувствительности по глубине слоя 4 - 5 %;
 4. Отклонение от средней чувствительности в партии 4%;
 5. Отклонение от средней чувствительности от партии к партии 5 %;
 6. Объемная вуаль – число зерен вуали в объеме 10^3 мкм³ 3.0 - 4.0;
 7. Коэффициент усадки - 1.2;
- При определении чувствительности и числа зерен вуали участки толщиной 5 мкм от поверхности слоя во внимание не принимают.
8. Средний диаметр проявленного зерна 0.5 мкм;
 9. Отклонение от среднего диаметра проявленного зерна ± 0.2 мкм;
 10. Габитус проявленного зерна – сфера;
 11. Регрессия скрытого изображения - зависимость потери чувствительности

от времени хранения облученной эмульсии (при температуре 200 и влажности 60 %) 12 % - 15% в течение года. Эмульсионные слои не должны иметь дихроической (цветной) вуали, пузырей, черных и белых точек, различных “грязевых” включений, царапин и других дефектов, влияющих на качество изображения следов релятивистских частиц.

12. Ядерная фотоэмульсия имеет химический состав, отличающийся на 2% – 3% от российской эмульсии БР-2 или эмульсии производства Fuji Film для эксперимента по изучению нейтринных осцилляций OPERA (ЦЕРН, Женева, [https://ru.wikipedia.org/wiki/OPERA_\(эксперимент\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/OPERA_(эксперимент))). Ядерная фотоэмульсия нанесена на мягкую основу (типа майларовая подложка, оптически прозрачная).

13. Каждая производимая партия должна сопровождаться контрольным тестовым образцом, размером 10 см x12.5 см, проявленным и готовым для микроскопической оценки на автоматическом сканирующем комплексе.

14. Упаковочный пакет каждой партии должен содержать информацию о дате синтеза и полива эмульсионного слоя, толщине политого слоя до проявки, толщине ТАЦ, размере и количестве фотоэмульсионных слоев в упаковке на русском и английском языках.

15. Для транспортировки эмульсия должна быть упакована в свето- и водонепроницаемые пакеты, жестко зафиксированные ровной поверхностью с обеих сторон упаковки во избежание механической деформации слоев во время транспортировки. Транспортировка не допускает перегрева, механических повреждений. Груз нехрупкий, но любые изгибы и трещины делают данный материал непригодным к использованию.

Таблица 1.4 Спецификация ядерной фотоэмульсии для эксперимента SND@LHC, ЦЕРН.

1. 3 Исследование процесса старения фотографической эмульсии

Благодаря развитию прецизионных сканирующих комплексов и автоматизированных методов обработки, в настоящее время стремительно растет количество физических экспериментов с использованием большого количества ядерной фотоэмульсии в качестве трекового детектора. В большей части таких полномасштабных экспериментов эмульсионные детекторы экспонируются в течение длительного срока - от нескольких недель до нескольких месяцев. При продолжительном хранении или использовании ЯФ, её чувствительность снижается, растет плотность объемной вуали, т.е. происходит так называемое “старение”, обусловленное окислением входящего в состав эмульсии серебра. В результате эффективность эмульсионного слоя снижается. Автором был предложен и успешно реализован эксперимент по тестированию старения ЯФ в различных условиях – в термокамере (ускоренное старение) и в естественных условиях (естественное старение). В ходе эксперимента изучались свойства ЯФ, произведённой на российском предприятии ООО “СЛАВИЧ”, где была восстановлена технология производства релятивистской ЯФ. Тестировалась эмульсия с размером кристаллов галогенида серебра ~ 250 нм и содержанием Ag^+ в геле порядка 40%. Эмульсия данного типа планируется для использования в экспериментах с длительной экспозицией от 3 месяцев и более, например, [36–38]. Для испытаний брались образцы с двусторонним поливом эмульсии на триацетатцеллюлозную основу. Цель представленного исследования – изучение и анализ изменений свойств ЯФ производства ООО «Славич» с течением времени в различных условиях.

Ускоренное старение в термокамере. Для изучения ускоренного старения применялась термостатическая камера (термокамера) GENVIRO производства Италии [39] в Национальной Лаборатории Гран Сассо. В камере может поддерживаться постоянная температура в диапазоне от -40° до $+180^\circ\text{C}$ и влажность от 0 до 99%. Система управления термокамеры позволяет контролировать условия проведения испытаний в режиме реального времени, объединяя непрерывное считывание данных с мониторингом и записью текущих

значений параметров. В данном эксперименте использовался эмпирически подобранный режим ускоренного старения для данного типа эмульсии (см. таблицу 1.5).

Номер образца	Начало ускоренного старения	Конец ускоренного старения	Общая экспозиция	Температура, °C	Влажность, %
20_контрольный 1	без экспозиции		2 недели	14-16	45-55
20_контрольный 2	без экспозиции		3 мес.	14-16	45-55
S-3	19.07.2019	20.07.2019	4 мес.	35	50
S-4	19.07.2019	21.07.2019	5 мес.	35	50
S-5	19.07.2019	22.07.2019	6 мес.	35	50
S-6	19.07.2019	23.07.2019	7 мес.	35	50
S-7	19.07.2019	24.07.2019	8 мес.	35	50
S-8	19.07.2019	25.07.2019	9 мес.	35	50
S-9	19.07.2019	26.07.2019	10 мес.	35	50
S-10	19.07.2019	27.07.2019	11 мес.	35	50
S-11	19.07.2019	28.07.2019	12 мес.	35	50

Таблица 1.5 Временной режим ускоренного старения образцов ядерной эмульсии «Славич» в термокамере GENVIRO.

Два взятых для исследований слоя ЯФ размером по 100 мм×125 мм были разрезаны на 6 частей каждый, и упакованы по одному в светонепроницаемые пакеты. Контрольный образец № 1 был проявлен спустя две недели после полива в целях определения качества ЯФ. Тестируемые образцы и второй контрольный подвергались естественному старению в течение 3 месяцев после полива. Затем все образцы, за исключением контрольных, выдерживались в термокамере от 1 до 10 дней, в соответствии с таблицей 1.5. При этом один день ускоренного старения приравнивался к месяцу естественного старения, что учитывается в таблице как «общая экспозиция».

По окончании экспозиции в термокамере все образцы, включая контрольный, были проявлены автором в помещении химической лаборатории Гран Сассо. При визуальном осмотре проявленных образцов не было обнаружено каких-либо заметных недостатков: образцы были прозрачные, без дихроической (цветной) вуали, пузырей, черных и белых точек, грязевых включений, царапин и других дефектов, влияющих на качество изображения.

Сканирование проявленных образцов осуществлялось на многоцелевом автоматизированном измерительном комплексе ПАВИКОМ. На рисунке 1.19 показано изображение одного поля зрения размером 390 мкм× 310 мкм на глубине 20 мкм в эмульсии, полученное на ПАВИКОМ с увеличением 50 $\times$.

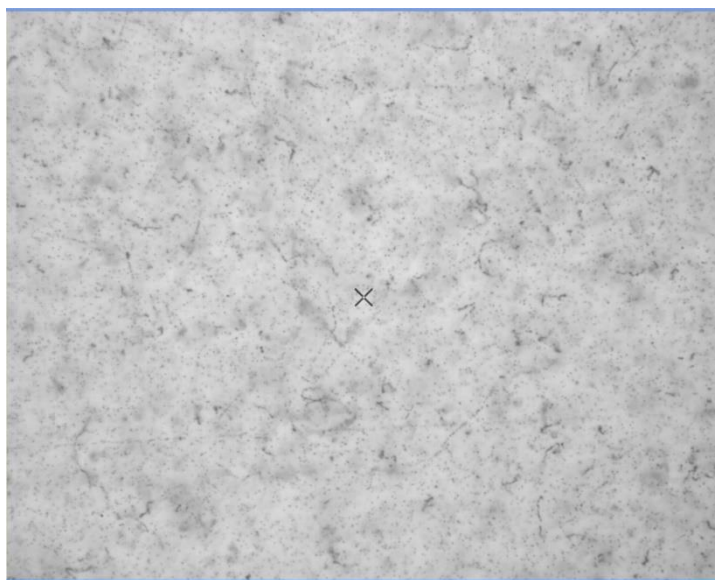


Рисунок 1.19 Изображение на глубине 20 мкм от поверхности проявленного верхнего эмульсионного слоя. Размер поля зрения 310 мкм×390 мкм.

Сканирование каждого образца осуществлялось в его центральной части в области размером 1×1 см. Такой выбор области сканирования был обусловлен наименьшим количеством возможных механических дефектов, связанных с разрезанием эмульсионного слоя и с процессом химической проявки, при которой технический отступ от края составляет около 0,5 мм. На основе сканирования проводилась процедура реконструкции треков. Пример реконструкции так называемых микротреков (участков трека, восстановленных отдельно в верхнем и нижнем эмульсионных слоях одной плёнки) представлены

на рисунке 1.20. Значения на осях абсцисс и ординат на рисунке соответствуют размеру отсканированной зоны в мкм, цветовая шкала обозначает число реконструированных треков.

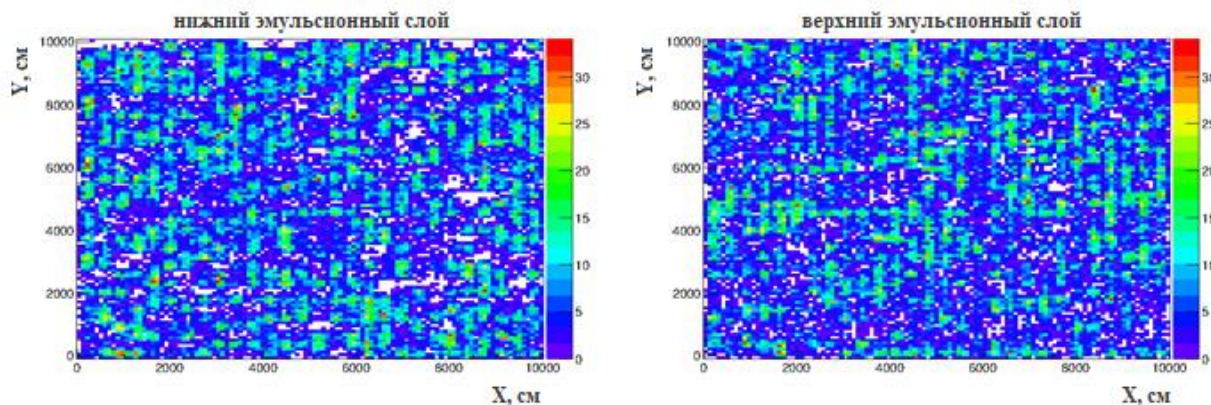


Рисунок 1.20 Плотность микротроек частиц в одной из плёнок ЯФ: в нижнем эмульсионном и верхнем эмульсионном слое соответственно.

Измерения показали, что микротреки распределены равномерно по отсканированной площади во всех образцах, что указывает на отсутствие каких-либо заметных дефектов эмульсии.

Одной из важнейших технических характеристик ЯФ является так называемая объемная вуаль, которая характеризуется числом проявленных зерен серебра в 1000 мкм^3 эмульсии. При избыточном количестве таких зерен значительно затрудняется как процесс сканирования, так и последующая реконструкция треков. Допустимая плотность вуали, при которой возможна эффективная обработка данных, колеблется в интервале от 2 до 10 зерен/ 1000 мкм^3 . На рисунке 1.21 представлено изменение плотности вуали в границах отсканированной площади с момента производства эмульсии до 12 месяцев ускоренного старения. По оси абсцисс отложено время, в течение которого экспонировалась эмульсия, а по оси ординат – число проявленных зерен в объеме 1000 мкм^3 .

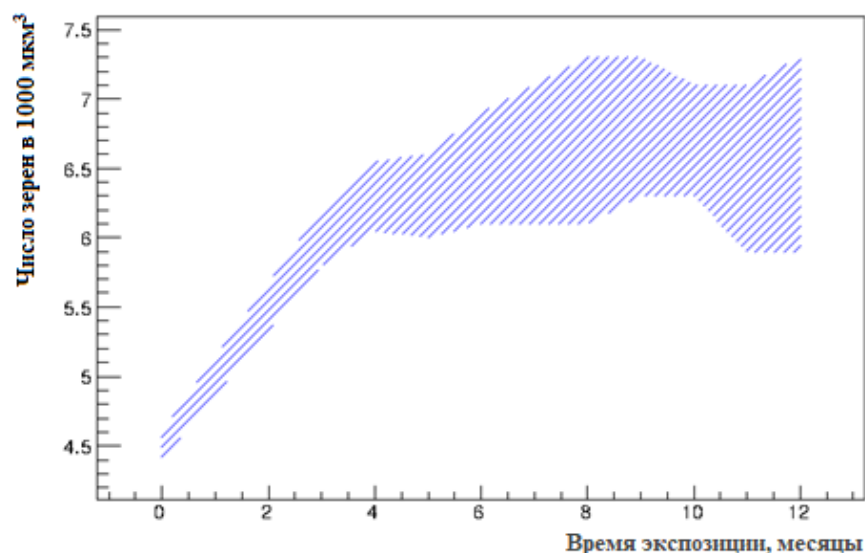


Рисунок 1.21 Изменение плотности фоновых зерен в объеме эмульсии с течением времени.

Ширина распределения по оси ординат отображает диапазон значений объёмной вуали на площади $1\text{ см} \times 1\text{ см}$. Из представленных данных видно, что в первые 3-4 месяца общей экспозиции наблюдался незначительный рост объёмной вуали (на 5% - 15% от первоначального значения), а по истечении 6 месяцев вуаль увеличилась на 25% - 30% и не изменялась в течение оставшегося времени.

Экспозиция образцов ЯФ в термокамере проводилась в подземной лаборатории Гран-Сассо итальянского Национального института ядерной физики (итал. *Laboratori Nazionali del Gran Sasso*; сокр. LNGS). Подземное расположение лаборатории (3100 м водного эквивалента) позволяет на много порядков уменьшить фон космического излучения, так что его воздействием на образцы в термокамере можно пренебречь. Контрольный образец №2 находился вместе с другими образцами на экспозиции в естественных условиях в течение трёх месяцев, и все эти образцы до помещения в термокамеру набрали одинаковое количество треков. Следовательно, после помещения в термокамеру все изменения происходили только за счёт старения эмульсии, и расхождение в количестве реконструированных треков в контрольном образце и в тестируемых

образцах могло возникнуть исключительно за счёт старения, т.е. в результате увеличения вуали и появления ложных фоновых треков.

На рисунке 1.22 показано число реконструированных треков частиц космического излучения в каждом образце на площади $1\text{ см} \times 1\text{ см}$, отнормированное к числу треков в контрольном образце №2 на той же площади. Представлена зависимость этой величины от времени экспозиции в термокамере. Каждая точка на графике соответствует отдельному эмульсионному образцу. Производился подсчёт так называемых базовых треков БТ, реконструированных в одной эмульсионной плёнке на основе микротреков, проходящих через оба её эмульсионных слоя.

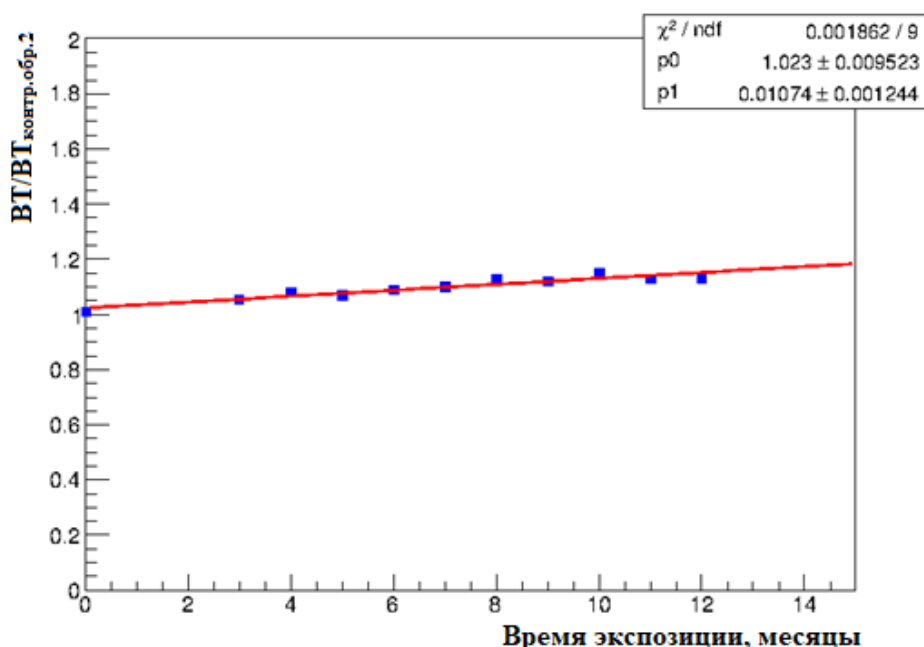


Рисунок 1.22 Отношение числа реконструированных треков космических лучей в образцах с разным временем экспозиции в термокамере к числу треков в контрольном образце №2.

Данные были аппроксимированы линейной функцией $f(x)=1,023+0,011x$. Как видно из рисунка 1.22, за период старения ЯФ от одного месяца до года уменьшения числа реконструированных треков не произошло. Незначительный рост их относительного числа мог быть обусловлен небольшим увеличением вуали с течением времени и, как следствие, появлением ложных треков. Таким образом, в первые 3-4 месяца ускоренного старения эмульсия демонстрирует стабильность основных свойств, заявленную производителем. По истечении

этого времени наблюдается небольшой рост объемной вуали (порядка 20-25 % от первоначального), однако от 4 месяцев до года экспозиции число проявленных зерен в единице объема существенно не изменилось.

Старение в естественных условиях. Для изучения естественного старения автором были взяты 16 слоёв одного и того же синтеза и партии ЯЭ размером 5см×6 см каждый. Маркировка образцов дана в таблице 2, а схема взаимного расположения слоёв в процессе экспозиции представлена на рисунке 1.23.

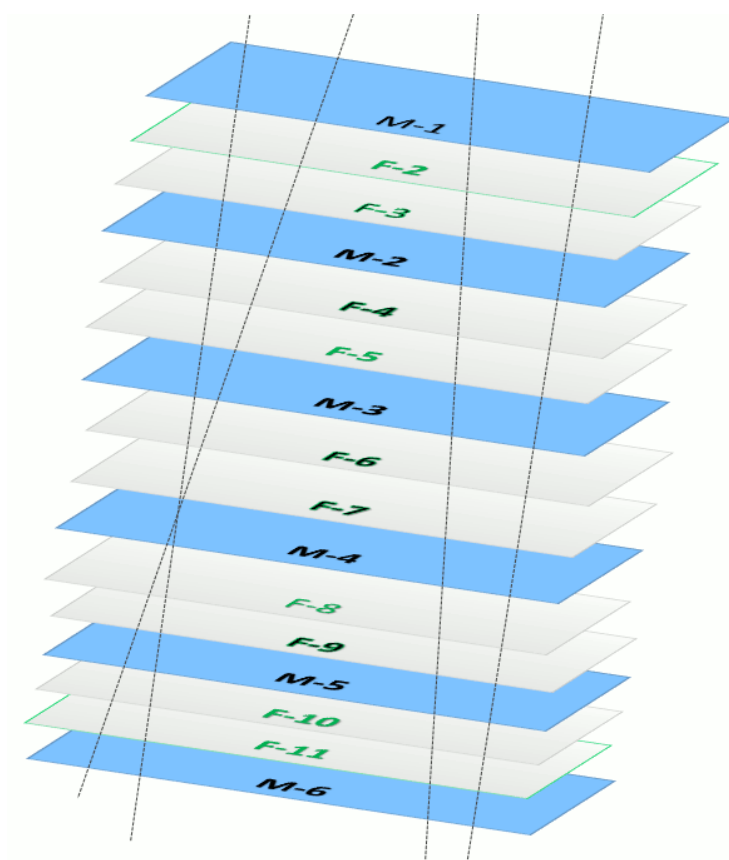
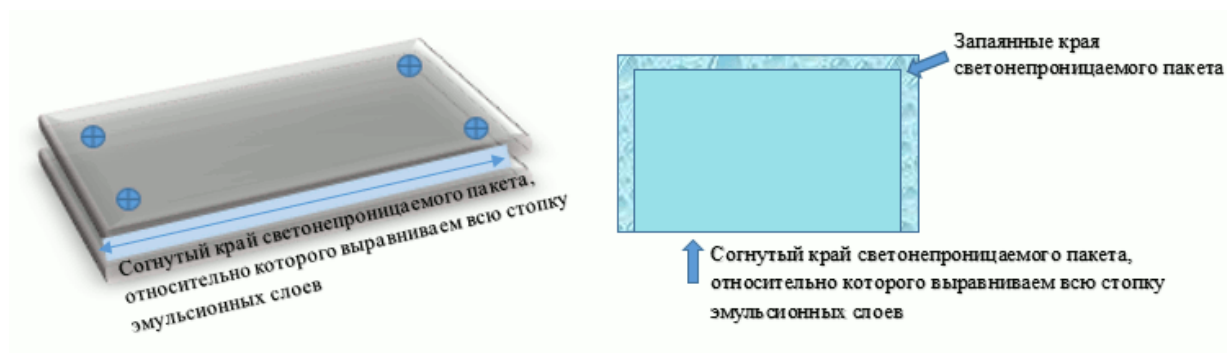


Рисунок 1.23 Расположение эмульсионных слоёв друг относительно друга при сборке для теста на естественное старение.

Каждый образец был промаркирован в темной комнате и упакован под вакуумом в отдельный светонепроницаемый пакет. Все эмульсионные слои были выравнены относительно линии сгиба пакетов и стянуты двумя металлическими пластинами, как показано на рисунке 1.24.



а)



б)

Рисунок 1.24 а) Схема сборки эмульсионных слоёв в детекторе при проверке естественного старения: слои стянуты двумя металлическими пластинами и выравнены вдоль горизонтальной оси; б) собранный детектор: вид сверху (слева) и сбоку (справа).

Собранный детектор экспонировался в течение одного месяца, после чего был разобран, и шесть образцов с маркировкой от М-1 до М-6 были проявлены на СЛАВИЧЕ и отсканированы на комплексе ПАВИКОМ. По результатам сканирования в этих образцах была проведена реконструкция так называемых объёмных треков атмосферных мюонов ОТ (треки, проходящие через всю стопку эмульсионных пластин, см. рис. 1.23), на основе которых производилась оценка регрессии треков (уменьшения эффективности реконструкции ОТ по причине старения эмульсии) в остальных эмульсионных слоях.

Оставшиеся десять эмульсионных слоёв с маркировкой от F-2 до F-11 хранились до проявки вертикально в подвальном прохладном помещении при температуре 16 градусов и влажности 55-60% в течение разного времени, причём

порядок их взаимного расположения, после разбора детектора, был изменён. Таким образом, фоновые треки, набранные после разборки детектора каждой отдельной эмульсионной пластиной, при дальнейшей экспозиции не участвовали в реконструкции VT треков, прошедших через весь детектор. Проявка образцов проводилась с периодичностью один месяц в соответствии с таблицей 1.6.

ID-номер эмульсионного слоя	Срок естественного старения	Примечание
M-1	1 мес.	первый слой для сшивки космическими мюонами
M-2	1 мес.	второй слой для сшивки космическими мюонами
...		
M-6	1 мес.	шестой слой для сшивки космическими мюонами
F-2	2 мес.	срок дополнительного хранения 2 месяца
F-3	3 мес.	срок дополнительного хранения 3 месяца
...		
F-11	11 мес.	срок дополнительного хранения 11 месяцев

Таблица 1.6 Стадии проявки фотоэмульсионных слоев ООО «СЛАВИЧ».

Таким образом, образцы M1-M6 были проявлены одновременно после одного месяца экспозиции в естественных условиях; в то время как образцы с индикацией F1, F2, ... проявлялись с последовательным добавлением одного дополнительного месяца экспозиции (см. таблицу 1.6). По истечении года был проявлен и отсканирован последний образец, и произведена реконструкция всех мюонных треков, проходящих через детектор.

На рисунке 1.25 показано изменение распределения плотности зерен вуали от момента производства ЯФ до конца экспозиции.

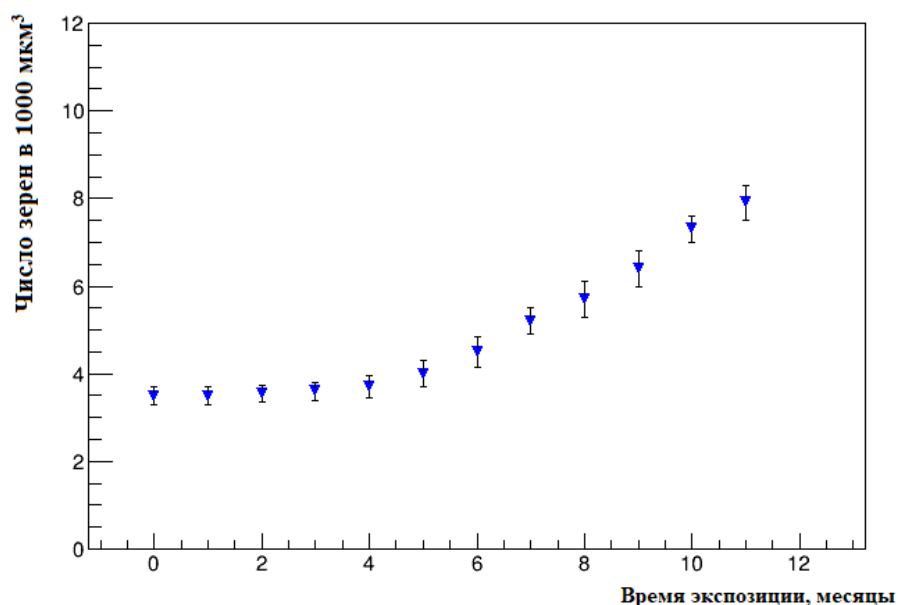


Рисунок 1.25 Изменение числа зерен вуали в единице объема от даты производства ядерной эмульсии до конца экспозиции в тестовом эксперименте на естественное старение.

Как видно из рисунка 1.25, результаты эксперимента по естественному старению демонстрируют стабильность технических характеристик протестированной ЯФ на протяжении первых 4-5 месяцев от даты производства. В период от 5 до 11 месяцев плотность вуали увеличилась примерно в 1,5 раза, однако осталась в пределах допустимой, т.е. меньше 10.

В эксперименте по естественному старению была осуществлена оценка регрессии треков. Были реконструированы ОТ, проходящие через весь объем детектора, после чего сравнивалось число реконструированных треков в эмульсионных слоях с различным временем экспозиции (образцы F1, F2, ..., F11) и число треков в образцах М1-М6. Согласно результатам, число ОТ треков, реконструированных в течение первых 6 месяцев старения (образцы F2- F6) совпадает с количеством треков, накопленным в идентичных условиях до разборки детектора (образцы М1-М6), т.е. регрессия треков, связанная с эффектом старения эмульсии, не наблюдается, а в период 7-11 месяцев (образцы F7- F11) не превышает 10%.

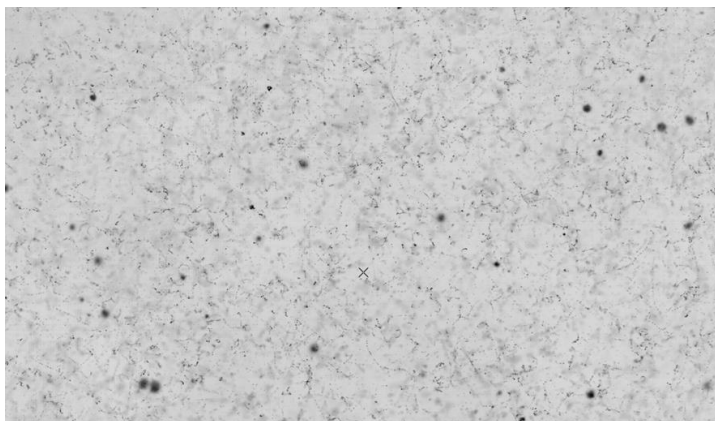
Более точная оценка эффективности регистрации и восстановления треков может быть получена с использованием ускорительных комплексов при облучении ЯФ однозарядными ионизирующими частицами.

Результаты данного эксперимента продемонстрировали высокую стабильность регистрирующих свойств ЯФ российского производства, отвечающую требованиям экспериментов с длительной экспозицией [40].

1.4 Процедура "рефрешинга" (emulsions refreshing)

При длительном хранении эмульсии, как было описано в главе I.3, фотоэмульсионные слои набирают естественный фон. Такие следы большей частью вызываются космическим излучением, распадом ядер, входящих в состав эмульсии, и др. При облучении таких эмульсионных слоев по истечении нескольких месяцев от момента производства и полива эмульсии, данный фон может быть трудно отделен от сигнала при облучении. Чтобы использовать фотоэмульсию, хранящуюся более трех месяцев, используется так называемая процедура "refreshing" [30]. Существует несколько методов уничтожения фона, основанных на окислении скрытого изображения в фотоэмульсии. Так, например, Перфилов и Пауэлл использовали метод погружения пластинок в окисляющий раствор – хромовую кислоту с концентрацией 2%, однако применение данного метода делает фотоэмульсию нечувствительной к протонам и более легким частицам, т.е. применение данной методики "refreshing" возможно для регистрации ядер с зарядом два и более. В настоящее время используется метод "refreshing", где в качестве окислителя используется водяной пар при определенной температуре, который дает минимальную потерю чувствительности и может быть использован в экспериментах с регистрацией однозарядных частиц. Такой тестовый эксперимент был проведен автором в лаборатории Гран Сассо, Италия для оценки возможности использования российской эмульсии в экспериментах на релятивистских ускорителях. Образцы фотоэмульсии российского производителя из одной партии производства помещались в термокамеру с определенными температурой и влажностью в

диапазоне $H=(60 - 98)\%$ и $T= 28^{\circ} \text{ C}$ с целью подобрать наиболее оптимальные параметры для максимального “refreshing” без потери чувствительности эмульсионных слоев при регистрации однозарядных частиц. На рисунке 1.26 представлены фото одного поля зрения при различных условиях проведения эксперимента.



а) $H=60\%$, $T= 28^{\circ}$



б) $H=80\%$, $T= 28^{\circ}$



в) $H=95\%$, $T= 28^{\circ}$

Рисунок 1.26 Фото одного поля зрения 600×800 мкм эмульсионного слоя. Фото сделано на сканирующем комплексе ПАВИКОМ с 20-кратным увеличением:

а) $H=60\%$, $T= 28^{\circ} \text{ C}$, $t=24-26$ часов

б) $H=80\%$, $T= 28^{\circ} \text{ C}$, $t=24-26$ часов

в) $H=95\%$, $T= 28^{\circ} \text{ C}$, $t=24-26$ часов

Фотографии на рисунке 1.26 наглядно демонстрируют, что при $H=95\%$, $T=28^{\circ}\text{C}$ следы от фоновых взаимодействий на образце фотоэмульсии минимальны.

	Влажность $H, \%$	Температура $t, ^{\circ}\text{C}$	Время экспозиции в термокамере, часы
“Refreshing”	95	28	24 -26
Сушка	60	20	24

Таблица 1.7 Условия наиболее эффективной процедуры “refreshing” фотоэмульсионных слоев российского производства.

Таблица 1.7 отображает подобранные эмпирическим путем параметры для “refreshing” процедуры ядерных фотоэмульсий ООО “СЛАВИЧ” для экспериментов с регистрацией однозарядных частиц, прежде всего, в фундаментальных исследованиях на ускорителях с минимальной потерей эффективности фотоэмульсионного слоя .

Глава 2. Фундаментальные исследования с использованием ядерной фотоэмульсии на базе обработки данных на комплексе ПАВИКОМ

2.1 Сканирующий комплекс ПАВИКОМ

Автоматизированный измерительный комплекс ПАВИКОМ (Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс) был создан в ФИАН с целью высокотехнологичной обработки экспериментальных данных в области ядерной физики, физики космических лучей и физики высоких энергий, полученных с помощью трековых детекторов (ТД). Главным отличием комплекса от других подобных систем в мире и его уникальным достоинством является универсальность – на входящих в его состав трех сканирующих оптических микроскопах обрабатываются ТД самых разных типов: 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 [41], индивидуальные технические возможности которых определяются диапазоном перемещения микроскопного столика и, соответственно, допустимыми размерами материалов для обработки. С их помощью в режиме полной автоматизации осуществляется поиск и оцифровка координат треков заряженных частиц в материале детектора, распознавание и прослеживание треков, систематизация и первичная обработка данных.

На ПАВИКОМ осуществляется обработка и анализ экспериментальных данных целого ряда российских и международных экспериментов, фактически он используется в режиме центра коллективного пользования. Для каждого эксперимента группой ПАВИКОМ совершенствуются методы анализа изображения с учетом поставленной физической задачи, разрабатывается новое программное обеспечение и, при необходимости, производится доработка аппаратуры и ее адаптация для целей экспериментов.

Основными компонентами сканирующих установок ПАВИКОМ являются оптические микроскопы, оснащенные высокоскоростными видеокамерами, платами оцифровки видеоизображения, автоматическими прецизионными

столами, графическими станциями и мощными современными компьютерами. Алгоритм работы установок следующий: объектив микроскопа формирует на чувствительной матрице видеокамеры последовательно по всей глубине детектора изображение образованного выстроенными в линию черными рейками трека; 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 комплекса, ПАВИКОМ-1, установлен большой прецизионный стол фирмы MICOS с оптической системой, комплектуемой в соответствии с поставленной экспериментальной задачей. Он включает массивную платформу и подвижный предметный столик размером 500мм × 800 мм (рис.2.1).

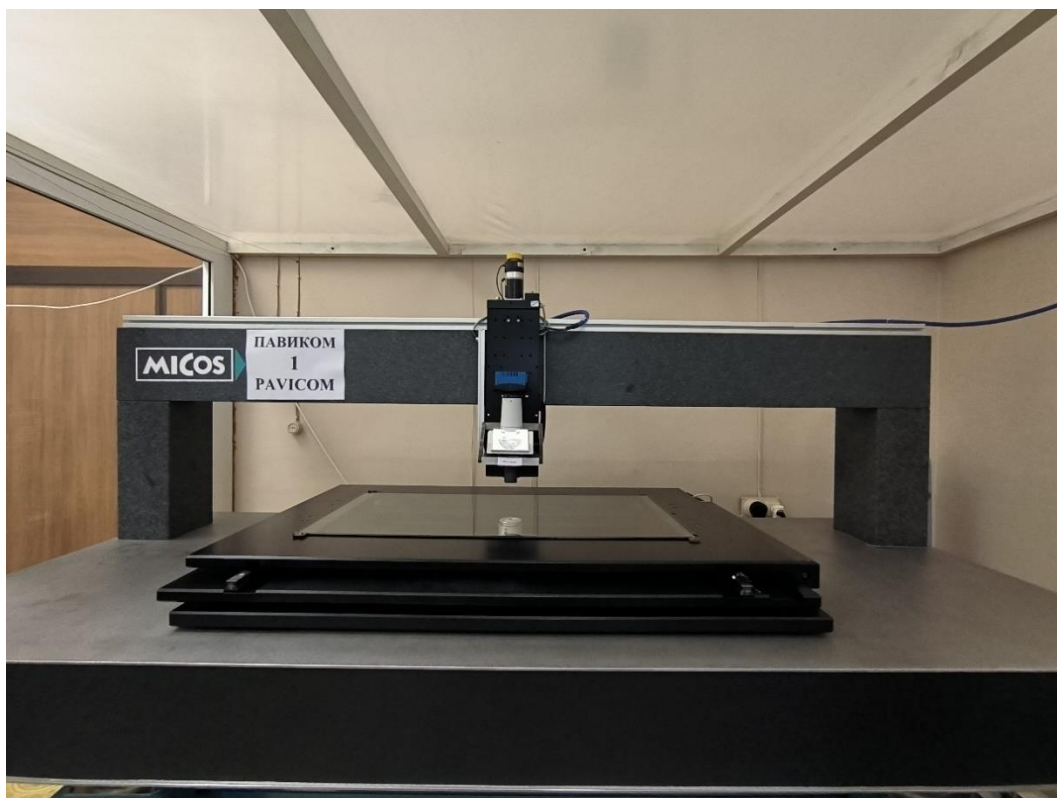


Рисунок 2.1 Автоматизированная установка ПАВИКОМ-1.

Над столом закреплен оптический блок, оснащенный видеокамерой, с возможностью перемещения в вертикальной плоскости. Точность позиционирования предметного стола составляет 0,5 мкм. Виброустойчивость

стола достигается большой массой установки (~ 1 т). Для уменьшения теплового расширения кронштейн для крепления микроскопа выполнен из гранита. Управление предметным столом осуществляется при помощи одного из сканирующих модулей ПО ПАВИКОМ. 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 [42].

Сканирующий комплекс ПАВИКОМ-1 ввиду размеров предметного столика $500\text{мм} \times 800$ мм, в основном задействован для сканирования эмульсионных пластин и рентгеновских пленок большого размера. В настоящее время на установке идет сканирование эмульсий $192\text{мм} \times 192$ мм нейтринного детектора эксперимента SND@LHC [43]. ПАВИКОМ-1 предоставляет возможность последовательного сканирования до восьми слоёв облучённой ядерной эмульсии, что позволяет существенно сократить время обработки при перезапуске процесса сканирования, требующем участия оператора. Таким образом, использование сканирующей станции ПАВИКОМ-1 ставит ЛЭЧ ФИАН в разряд сканирующих лабораторий для обработки данных эксперимента SND@LHC в необходимом режиме наравне с другими действующими мировыми сканирующими лабораториями.

Внешний вид сканирующей станции ПАВИКОМ-2 показан на рисунке 2.2. Первоначально установка была создана для обработки эмульсий черновского эксперимента EMU-15 [44,45], а уже позже была адаптирована для работы с кристаллами и оптическими стёклами [46,47]. ПАВИКОМ-2 создан на базе микроскопа ЛОМО МПЭ-11 с интегрированным прецизионным столом

немецкой фирмы Carl Zeiss, совмещённым с блоком управления. Оптика микроскопа проецирует изображение объекта на ПЗС-матрицу с увеличением до 90 $\times$.



Рисунок 2.2 Автоматизированная установка ПАВИКОМ-2.

Перемещение оптического столика по всем координатам осуществляется шаговыми двигателями, управляемыми контроллером Carl Zeiss, на который поступают команды от компьютера. Точность измерения координат X, Y и Z составляет 0,25 мкм. Пределы автоматического перемещения столика по оси X составляют от 0 до 120 мм, а по оси Y - от 0 до 100 мм; пределы перемещения объектива по координате Z - 10 мм.

Установка ПАВИКОМ-3, см. рис. 2.3 изначально использовалась для сканирования ядерных эмульсий эксперимента OPERA [см. 2.2 глава 2]. В настоящее время сканирующая станция ПАВИКОМ-3 успешно используется для обработки и анализа данных фундаментальных (SND@LHC) [см. 2.3 глава 2] и прикладных (мюнография) исследований, [см. глава 4].

Моторизированный стол микроскопа ПАВИКОМ-3 аналогичен столу ПАВИКОМ-1, но имеет меньший диапазон перемещения предметного столика: 200мм $\times$ 200 мм. Вакуумная система для фиксирования эмульсии на предметном

столике в процессе сканирования поддерживает давление в пределах 250-500 мбар. На компьютере, подключенном через контроллер управления к механике стола фирмы MICOS, установлена программа PAVICOM/LASSO [48], управляющая движением сканирующей станции.

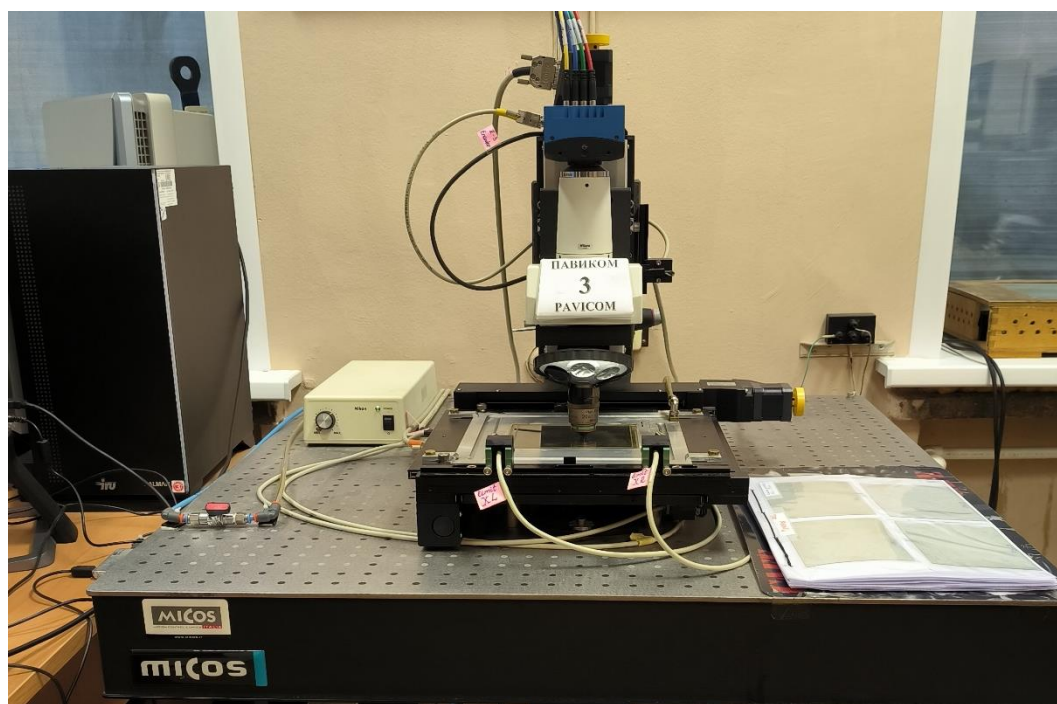


Рисунок 2.3 Автоматизированная установка ПАВИКОМ-3.

В состав оборудования для микроскопов ПАВИКОМ входят следующие комплектующие: видеокамера Mikrotron EoSens4CXP (монохромная, с фронтальной платой C-Mount), кабель для видеокамеры CXP 5W5 DIN1.0/2.3 to DIN1.0/2.3 длиной 5 м, плата захвата изображений microEnable 5 ironman AQ8-CXP6D, объектив Nikon CFI Plan Fluor 20X MI, 20х, графическая станция (ПК iRU Corp 719 TWR i9 9900K//64gb/4+4TB 7.2k/SSD512GB/RTX2080ti 11GB/NVIDIA GeForce RTX 2080Ti/W10Pr64), светодиоды PT-121-RAX-L15-MPH (Luminus Devices), программируемый источник питания EA-PS 3040-20 и др. Сравнительные характеристики для трех сканирующих станций ПАВИКОМ представлены в таблице 2.1.

Сканирующая станция	ПАВИКОМ-1	ПАВИКОМ-2	ПАВИКОМ-3
Автоматический прецизионный стол			
Производитель	MICOS	MICOS	MICOS
Диапазон перемещения стола, мм	800x500	200x200	200x200
Точность измерения координат, мкм	0.5	0.5	0.5
Оптика			
Производитель	Nikon	Nikon	Nikon
Максимальное увеличение	20x	60x	60x
Коррекции	Plan Fluor	Plan Fluor	Plan Fluor
Числовая апертура	0.75	0.75	0.75
Оптический фильтр	Зеленый	Зеленый	Зеленый
Плата захвата изображений			
Производитель	SiliconSoftware	SiliconSoftware	Matrox
Модель	microEnable 5	microEnable 5	Odyssey XPro
Интерфейс	PCIe 8x	PCIe 8x	PCI-X
Видеокамера			
Производитель	Mikrotron	Mikrotron	Mikrotron
Модель	MC-4086	MC-4086	MC-1310
Тип датчика	CMOS	CMOS	CMOS
Размер пикселя, мкм	7 x 7	7 x 7	12 x 12
Разрешение видеокамеры, пкс	2336 x 1728	2336 x 1728	1280 x 1024
Частота кадров, кадр/с	563	563	376
Скорость передачи данных, МБ/с	~2100	~2100	~500
Обработка изображений			
Производитель	nVidia	nVidia	nVidia
Модель	RTX-2080	RTX-2080	RTX-2080
Чипсет	GPU	GPU	GPU
Программно-аппаратная архитектура	CUDA	CUDA	CUDA

Таблица 2.1 Технические характеристики сканирующих станций ПАВИКОМ-1, ПАВИКОМ-2, ПАВИКОМ-3.

Каждая из сканирующих станций: ПАВИКОМ-1, ПАВИКОМ-2, ПАВИКОМ-3 удовлетворяет следующим требованиям:

- Возможность безостановочного сканирования.
- Обработка изображений в режиме реального времени.
- Независимость от типа сканируемого детектора.
- Независимость от характера обрабатываемых данных.
- Возможность быстрой адаптации к новому оборудованию.
- Максимальная гибкость программы.
- Эффективная работа в многопроцессорных системах.
- Возможность участия в распределённых вычислениях.

Программное обеспечение ПАВИКОМ включает систему широкоугольного сканирования LASSO, которая является результатом исследований и разработок, направленных на увеличение скорости сканирования, расширение углового допуска при распознавании трека и высокую эффективность при реконструкции трека. Система реализована на аппаратном обеспечении European Scanning System [49] и обладает необходимой гибкостью для адаптации к оборудованию нового поколения.

Модульная архитектура программного обеспечения LASSO показана на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 Архитектура программного обеспечения LASSO.

Каждый модуль реализует определенную функцию и предоставляет удобные интерфейсы для ее использования. Модули камеры и предметного стола 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. Направляющий модуль координирует работу как предметного стола, так и камеры на этапе сканирования, вычисляет координаты изображения и отправляет их в модуль обработки изображений. Этот модуль выполняет реконструкцию кластеров (наборов смежных пикселей),

отправляя их в модуль отслеживания для реконструкции зерен (вертикальных цепочек кластеров) и микротреков (последовательностей зерен). Модуль Guide представляет собой интерфейс обратной связи, позволяющий управлять процессом сканирования путем изменения параметров сканирования без каких-либо перерывов, и внешний интерфейс управления, который может использоваться другими приложениями для управления процессом сканирования.

2.2 Эксперимент OPERA

Одним из крупнейших ускорительных экспериментов по количеству использованной ядерной эмульсии стал эксперимент OPERA по поиску нейтринных осцилляций [50]. Название эксперимента является аббревиатурой от «Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus» (поиск осцилляций нейтрино с помощью эмульсионного детектора). OPERA был первым экспериментом по прямой регистрации появления тау-нейтрино ν_τ в пучке мюонных нейтрино ν_μ (первый эксперимент «на появление»).

Детектор эксперимента OPERA располагался в подземной лаборатории LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Италия) на глубине около ~ 3100 m.w.e. на расстоянии 730 км от источника пучка мюонных нейтрино со средней энергией 17 ГэВ из ЦЕРН, см. рис. 2.5.



Рисунок 2.5 Схема прохождения пучка нейтрино от ЦЕРН до LNGS.

Энергия пучка была выбрана из условия компромисса между двумя конкурирующими требованиями: с одной стороны, чем меньше значение энергии, тем больше вероятность осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ для заданного расстояния, а с другой, при увеличении энергии возрастает сечение по каналу заряженного тока (Charged Current) CC-взаимодействия тау-нейтрино.

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos \frac{\Delta m^2 L}{2E_\nu}\right),$$

где параметры Δm^2 и $\sin^2 2\theta$ определяются методом χ^2 при анализе вероятности наблюдения осцилляций в пучке нейтрино с энергией E_ν ; на расстоянии L угол смешивания определяет долю состояний ν_1 и ν_2 в составе ν_e и ν_μ . При $\theta = 45^\circ$ смешивание максимальное; если разность масс «первичных» нейтрино мала, заметные результаты по исследованию осцилляций могут быть достигнуты только если длина L велика.

Детектор OPERA – гибридный детектор, объединивший в себе технологию детектирования в реальном времени (“электронные детекторы”) с технологией применения “эмульсионных пузырьковых камер” (Emulsion Cloud Chamber, ECC) с высоким угловым ($2 \div 3$ мрад) и пространственным ($\sim 1 \div 2$ мкм) разрешением. Необходимость высокого пространственного разрешения для регистрации каналов распада τ - лептона обусловлена малым временем жизни $t_\tau = 291 \times 10^{-15}$ с, (соответственно, пробегом $ct_\tau = 87$ мкм).

Критерием отбора событий служило отсутствие мюона в конечном состоянии. Полное восстановление вершины события, его топологии и кинематики позволили эффективно подавить фон других процессов, соотношение сигнал/шум в эксперименте составило ~ 10 .

Для генерации интенсивного пучка мюонных нейтрино в CERN использовался комплекс CNGS (“CERN Neutrinos to Gran Sasso”) . Основной компонентой пучка CNGS являлись мюонные нейтрино [51].

Общий вид детектора OPERA приведен на рис. 2.6. Детектор был разделен на два идентичных супермодуля (см. рис. 2.6 б), включавших мишень и мюонный спектрометр, кроме того, с передней (по пучку) стороны детектора имелась veto-система, которая использовалась для отбора нейтринных событий, произошедших внутри мишенной части.

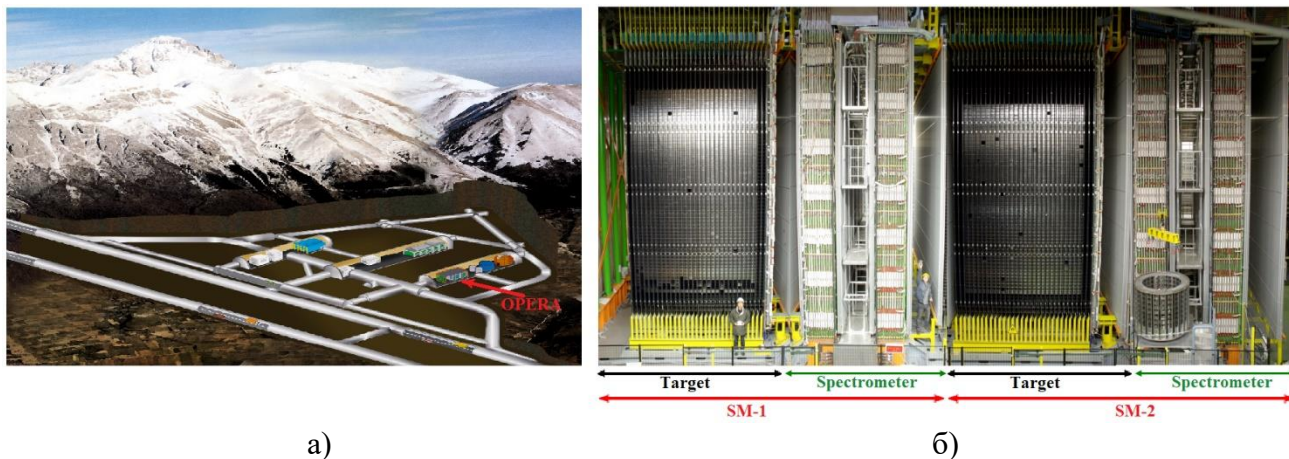


Рисунок 2.6 а) – схема подземной лаборатории LNGS (местоположение эксперимента OPERA показано красной стрелкой); б) – внешний вид детектора OPERA.

Масса мишени двух супермодулей составляла ~ 1250 тонн, из которой примерно 100 т приходилось на ядерную эмульсию. Каждая мишень состояла из 31 стенки, содержащей 2920 блоков (кирпичей), собранных по принципу ЕСС-камеры, чередующихся с горизонтальными и вертикальными плоскостями сцинтилляторов ТТ (Target Tracker). ТТ использовались для целеуказания по отбору кирпичей, в которых могло произойти взаимодействие нейтрино. Каждый кирпич массой 8,3 кг состоял из 57 эмульсионных пленок, чередующихся с 56 свинцовыми пластинами толщиной 1 мм и площадью $12,7 \times 10,2 \text{ см}^2$. Толщина одного кирпича соответствовала примерно десяти каскадным единицам, что обеспечивало развитие электромагнитного ливня в пределах кирпича. Структура мишени позволяла в случае необходимости извлечь любой кирпич из мишени. К задней стенке кирпича был прикреплён светонепроницаемый пакет с двумя эмульсионными плёнками CS (Changeable Sheets). Использование дублетов CS позволяло выполнить проверку факта взаимодействия нейтрино в конкретном кирпиче. Правильность выбора кирпича

подтверждалась, если по меньшей мере один трек, совместимый с реконструированными в электронных детекторах, обнаруживался в пленках CS. Эффективность регистрации при такой процедуре выбора наиболее вероятного или, в случае необходимости, двух наиболее вероятных кирпичей составила 77%. В случае, когда обрабатывалось от трёх до четырёх кирпичей на событие, эффективность анализа достигала 83%. Магнитный мюонный спектрометр, расположенный за каждым из мишенных модулей, использовался для измерения импульса мюонов.

Общая площадь смонтированных в мишенных модулях эмульсионных пленок составила 110000 м², а свинцовых пластин - 105000 м². За всё время эксперимента в подземной лаборатории LNGS методом роботизированной сборки было изготовлено около 150000 кирпичей с использованием более девяти миллионов эмульсионных пленок.

Принцип эксперимента можно сформулировать следующим образом: первоначально продукты взаимодействия нейтрино регистрировались сцинтилляторами ТТ, расположенными за каждой стеной мишени (рисунок 2.7). Реконструкция “оси ливня” или регистрация трека проникающей частицы (например, мюона) позволяла идентифицировать кирпич, в котором могло произойти взаимодействие. Этот кирпич извлекался из стены, прикрепленный дублет эмульсионных плёнок CS снимался и проявлялся, в то время как кирпич, все еще упакованный, помещался в специальное низкофоновое хранилище, защищенное пятисантиметровыми железными стенками, до получения результатов анализа CS. Кирпичи, ошибочно идентифицированные сцинтилляционными треками как содержащие взаимодействие, не разбирались, а возвращались в мишень с новым пакетом CS, что позволяло избежать ненужной обработки и сканирования неправильно идентифицированных кирпичей. Таким образом, дуплеты CS выполняли в эксперименте две важнейшие функции - подтверждение того, что кирпич

содержит нейтринное взаимодействие и регистрацию треков заряженных частиц из этого взаимодействия для обратного сканирования ЕСС.

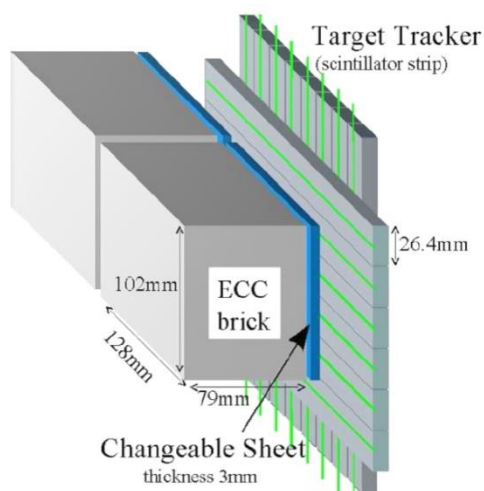
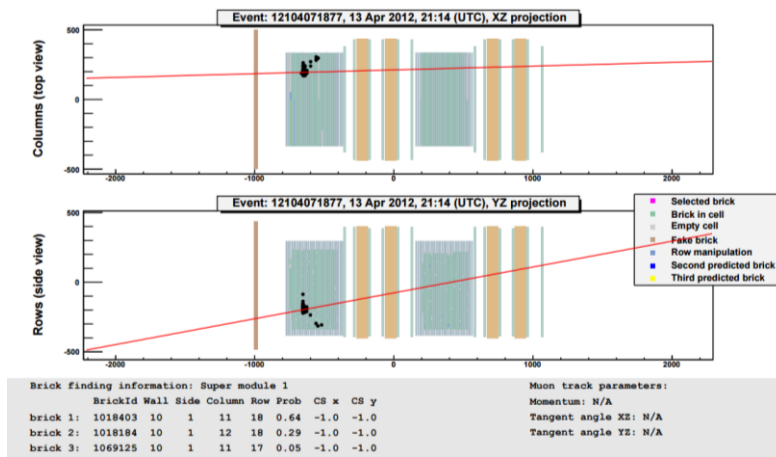


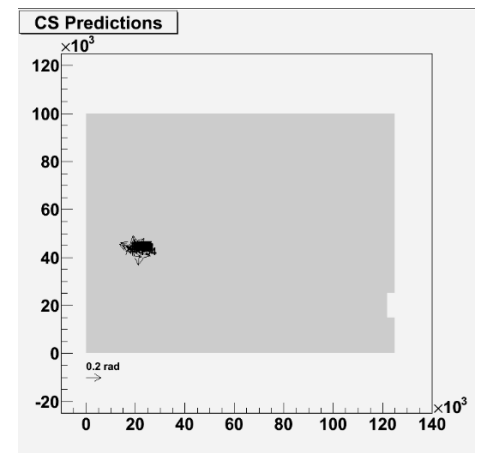
Рисунок 2.7 Схема монтажа кирпичей в мишени [30].

Если же в результате этого анализа CS в эмульсии обнаруживались сегменты трека, совпадающего с предсказаниями электронных детекторов, то, после извлечения ЕСС из соответствующего супермодуля, на эмульсионный кирпич наносились специальные метки для привязки положения последней (пятьдесят седьмой) эмульсионной пленки к положению внешней пары пленок CS с помощью коллимированного источника рентгеновского излучения. Следующим шагом калибровки эмульсионных пленок являлась 12-часовая экспозиция кирпича космическими мюонами в отсеке, защищенном сверху 40-сантиметровой железной плитой. Плита поглощала мягкую радиацию и пропускала только высокоэнергетичные мюоны, которые реконструировались в фотоэмульсии как прямые треки. Таким образом получали нормировочный набор треков для более точной сшивки эмульсионных пластин и реконструкции треков, а значит и более точных топологических и кинематических измерений. Затем кирпич разбирался, его пленки проявлялись в подземной химической лаборатории LNGS.

Пример целеуказания для одного из кирпичей, отсканированного в ЛЭЧ ФИАН электронного детектора и CS, а также результат реконструкции события представлены на рисунках 2.8 -2.9.



а)



б)

Рисунок 2.8 Вид целеуказания EventID:12104071877 BrickID:1018403 а) в электронном детекторе OPERA; б) – на сменной пластине CS одного из кирпичей, отсканированного на ПАВИКОМ-3, ФИАН.

Треки, обнаруженные в CS, служили основой для так называемой процедуры обратного сканирования: производилось прослеживание треков по целеуказаниям от CS в направлении, обратном к распространению пучка, т.е. от 57 пластины кирпича до трех последовательных пластин, в которых трек уже не наблюдался. Исчезновение трека указывало на возможную вершину взаимодействия нейтрино. В области объемом около 1 см^3 вокруг точки исчезновения трека проводилось дополнительное сканирование в последующих 10–15 пленках для обнаружения всех треков, относящихся к данной вершине, включая вторичные взаимодействия. На рисунке 2.9 представлен пример реконструкции для события, изображенного на рис. 2.8, сканирование и физический анализ которого выполнен в ФИАН автором работы.

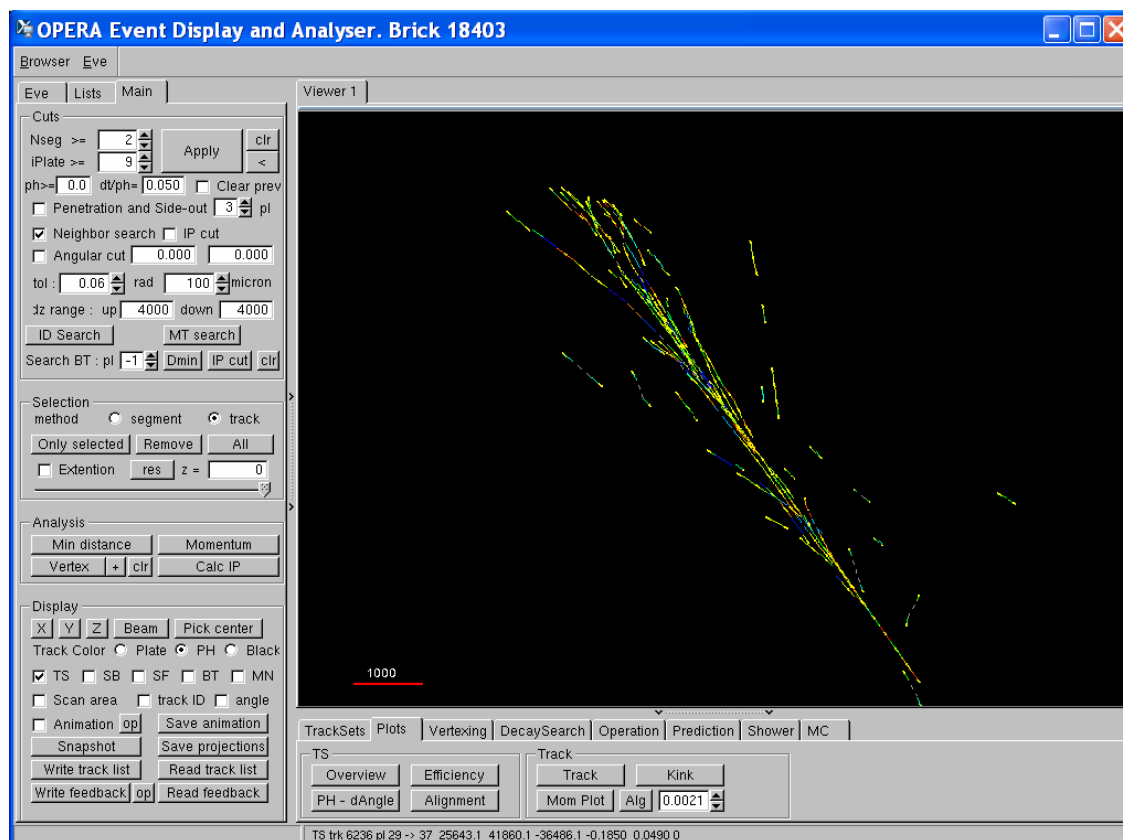


Рисунок 2.9 Реконструкция EventID:12104071877 BrickID:1018403 с использованием OPERA Event Display and Analyser.

При реконструкции события 12104071877, представленного на рисунке 2.9, найден только ливень, визуальная проверка показала, что он от одного электрона, никаких других треков, в том числе треков фрагментов, которые можно привязать к вершине, в объеме не обнаружено. Все отсканированные в ФИАН кирпичи занесены в единую базу данных эксперимента OPERA [52].

В случае, когда в результате обратного сканирования все треки выходили за пределы исследуемого эмульсионного кирпича, для анализа запрашивался следующий кирпич, который находился в направлении следования треков.

При физическом анализе событий-кандидатов на нейтринные взаимодействия в эксперименте OPERA выполнялся подробный кинематический анализ с помощью измерения энергии развившегося в ЕСС электромагнитного каскада, определения импульсов заряженных частиц путем измерения многократного кулоновского рассеяния в кирпиче и прослеживание

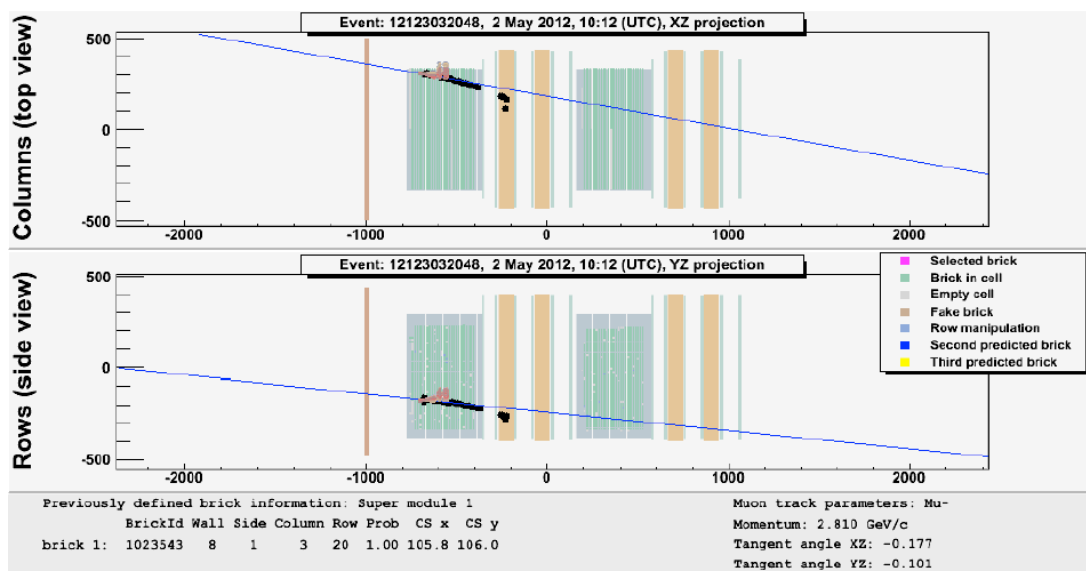
треков в последующих стенах мишени. За время эксперимента было зарегистрировано более 25 тысяч взаимодействий нейтрино всех типов. Сканирование событий проводилось в десятках лабораторий нескольких стран, в том числе в единственной в России Лаборатории элементарных частиц ФИАН при непосредственном участии автора работы [53,54].

Моды распада, а также их вероятности, изучаемые в эксперименте OPERA, представлены в таблице 2.2.

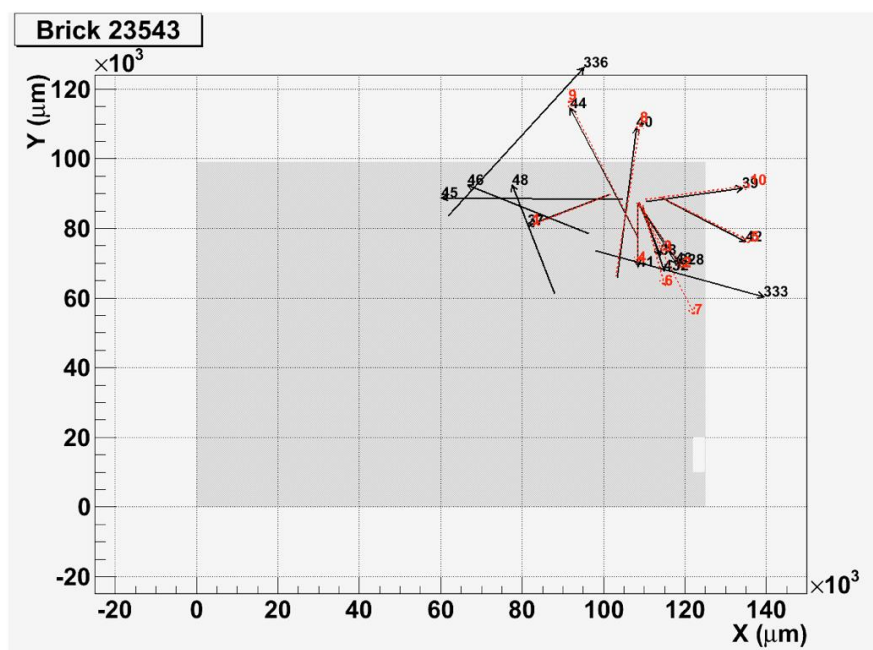
Мода распада	Доля вероятности, %
$\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e$	17,8
$\tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu$	17,7
$\tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau (n\pi^0)$	49,5
$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ \nu_\tau (n\pi^0)$	15,0

Таблица 2.2 Каналы распада τ - лептона.

Если в одной из лабораторий, участвующих в сканировании и обработке был кандидат распада τ - лептона, кирпич отправляли на независимое перекрестное сканирование в другую лабораторию. Пример такого перекрестного сканирования в лаборатории университета Фредерико II и сканирующей лаборатории ЛЭЧ ФИАН, представлен на рис. 2.10 – 2.13.



a)



б)

Рисунок 2.10 Вид целеуказания EventID:12123032048 BrickID:23543 а) в электронном детекторе OPERA; б) – на сменной пластине CS BrickID:23543.

В CS для события EventID:12123032048 BrickID:23543, представленного на рис.2.10 б, электронным детектором предсказано 11 треков (показано черными стрелками), часть из них подтверждено при сканировании и визуальном просмотре CS (показано красными стрелками) на этом же рисунке. После процедуры обратного сканирования определен номер пластины с остановкой всех прослеживаемых треков, сходящихся в вершину

взаимодействия. Результаты сканирования 1 см³ для нескольких последовательных пластин схематически представлен на рис. 2.11.

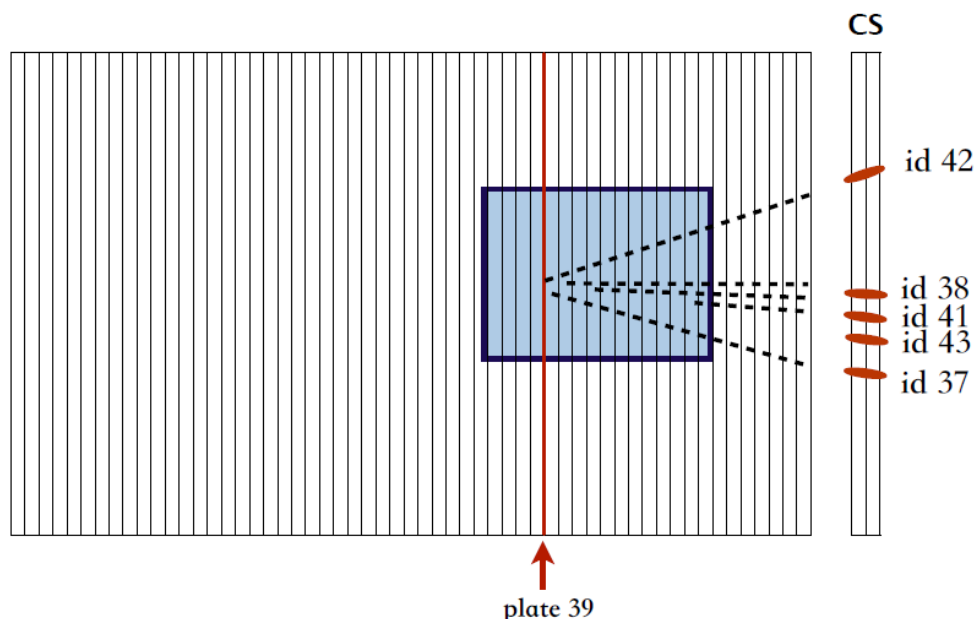


Рисунок 2.11 Схематическое представление определения пластины с вершиной взаимодействия для EventID:12123032048 BrickID:23543.

Реконструированные треки во взаимодействии EventID:12123032048 BrickID:23543 треки представлены на рис. 2.12.

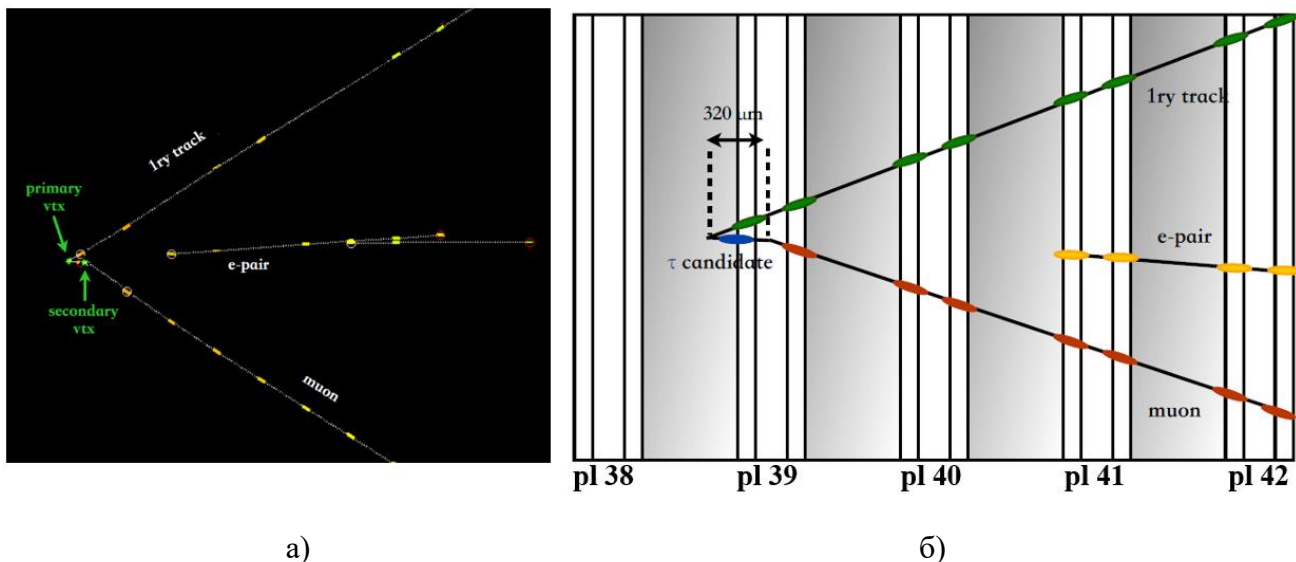


Рисунок 2.12 Реконструкция EventID:12123032048 BrickID:23543 а) с использованием OPERA Event Display and Analyser, б) схематическое представление реконструированного события с некоторыми параметрами взаимодействия.

Первичная вершина взаимодействия находится между 38 и 39 пластинами и содержит в себе два трека. Вторичная вершина находится в пластиковой основе

двустороннего эмульсионного 39-го эмульсионного слоя. Кандидат в τ -лептон, выходящий из первичной вершины взаимодействия нейтрино имеет излом (kink) $\sim 0,239$ рад. Результаты данного перекрестного сканирования были доложены автором работы на одном из совещаний в составе международной коллаборации OPERA [55].

Первый кандидат на тау-нейтрино был зарегистрирован в 2010 г [56]; реконструкция события представлена на рисунке 2.13.

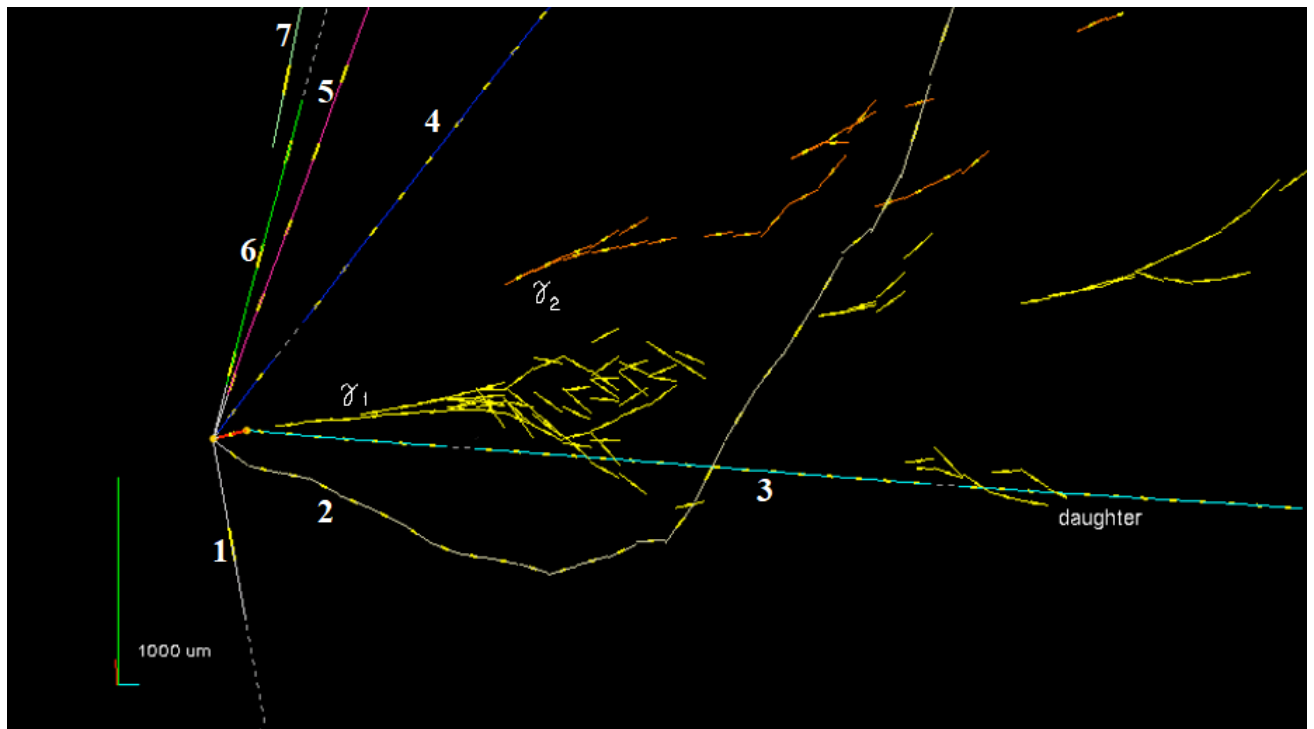


Рисунок 2.13 Реконструкция первого взаимодействия тау-нейтрино в эксперименте OPERA.

Видно, что взаимодействие не вызвано ни мюоном, ни электроном. Первичная вершина содержит 7 треков, один из которых (трек 3) имеет топологию кинк-распада. Проведенный кинематический анализ показал, что наблюдаемый распад соответствует каналу $\tau \rightarrow \rho \nu_\tau$, за которым следует распад $\rho \rightarrow \pi^0 \pi$.

В период с 2012 по 2015 год были зарегистрированы ещё 4 события с ν_τ [57]. Регистрация 5 событий - осцилляций мюонных нейтрино в таонные в эксперименте OPERA вошла в научное обоснование Нобелевской премии по

физике 2015 года. Сканирование эмульсионных пленок было полностью завершено в 2016 году. Всего за время эксперимента было зарегистрировано и обработано более 17000 событий взаимодействий нейтрино в детекторе OPERA. Открытие осцилляций мюонных нейтрино в таонные со статистической значимостью $6,1\sigma$ на основе наблюдения десяти ν_τ событий стало главным результатом эксперимента [58]. Данные эксперимента опубликованы на портале открытых данных ЦЕРН.

2.3 Эксперимент SND@LHC

Со дня создания и официального утверждения нового эксперимента SND@LHC (Scattering Neutrino Detector at LHC) в ЦЕРН [59] сотрудники ЛЭЧ ФИАН работают в составе международной коллаборации эксперимента SND@LHC. Это компактный автономный эксперимент для регистрации нейтрино всех трех ароматов и поиска слабо взаимодействующих частиц на LHC, который в настоящее время проводит измерения в ранее неисследованном диапазоне псевдобыстрот $7,2 < \eta < 8,4$. Детектор способен зарегистрировать также частицы легкой темной материи, рассеивающиеся на атомах мишени в области параметров, дополнительных по отношению к уже выполняемым экспериментам. Эксперимент SND@LHC был предложен в 2020 году и подготовлен к запуску в декабре 2021 года, в 2022 году начат набор статистики взаимодействий частиц в детекторе. Установка расположена в туннеле T118 БАК, в 480 м от точки IP1 (Interaction Point 1) столкновения встречных пучков протонов в детекторе АТЛАС. Детектор SND@LHC представляет собой гибридную систему на основе мишени из вольфрамовых пластин, чередующихся с эмульсионными и электронными трекерами, за которой расположена мюонная система. Такая конфигурация позволяет различать нейтрино всех трёх ароматов в области энергий, недоступной для других экспериментов на БАК. Использование ядерной эмульсии позволяет осуществлять поиск слабо взаимодействующих частиц в мишени детектора.

Через детектор, расположенный достаточно близко к оси пучка ускорителя, проходит интенсивный узко коллимированный (в пределах полярных углов $<$

2,5 мрад) пучок нейтрино с энергиями от 100 ГэВ до нескольких ТэВ, рождённых во взаимодействиях протонов с энергией в системе центра масс 13,6 ТэВ. Высокоэнергичные нейтрино возникают как результат лептонных W- и Z-распадов и распадов адронов, имеющих в составе b и c-кварки. Таким образом, нейтрино в исследуемой области псевдобыстрот от 7,2 до 8,4 можно рассматривать как индикатор рождения тяжелых ароматов. Аромат нейтрино определяется по типу соответствующего заряженного лептона и кинематике распада. В частности, тау-лептоны идентифицируются по наблюдению характерной вершины тау-распада в эмульсии и по отсутствию электрона или мюона в первичной вершине.

Детектор SND@LHC (рисунок 2.14) был спроектирован таким образом, чтобы при ограниченных размерах обеспечить достаточное количество вещества для измерения энергии частиц в калориметре и высокую эффективность идентификации мюонов, и поперечный размер мишени, позволяющий регистрировать частицы в необходимом интервале псевдобыстрот.

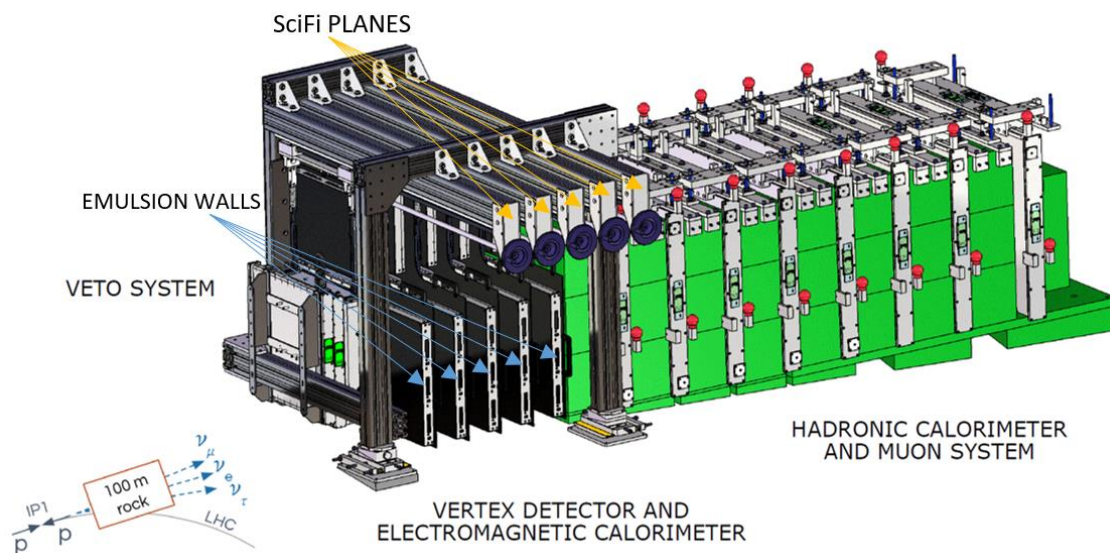


Рисунок 2.14 Схематическое изображение детектора SND@LHC. Синими стрелками показано положение эмульсионных детекторов, желтыми — положение детекторов из сцинтилляционных волокон SciFi [60].

В качестве вершинного детектора используется нейтринная мишень, выполненная по технологии ЕСС, которая, благодаря высокому разрешению в ядерных эмульсиях, позволяет идентифицировать τ -лептоны и очарованные

адроны, «распутывая» вершины их рождения и распада. Электроны идентифицируются по электромагнитным ливням, образующимся в мишени. Нейтринная мишень состоит из пяти параллельно установленных эмульсионных блоков (стенок) с поперечным размером $384 \times 384 \text{ мм}^2$ и общим весом 830 кг. Каждая стенка собрана из четырех ячеек (кирпичей) из 60 эмульсионных пленок, чередующихся с 59 вольфрамовыми пластинами толщиной 1 мм. Параметры одной стенки показаны на рисунке 2.15. Вся нейтринная мишень SND@LHC содержит 1200 эмульсионных пленок общей площадью около 44 м^2 .

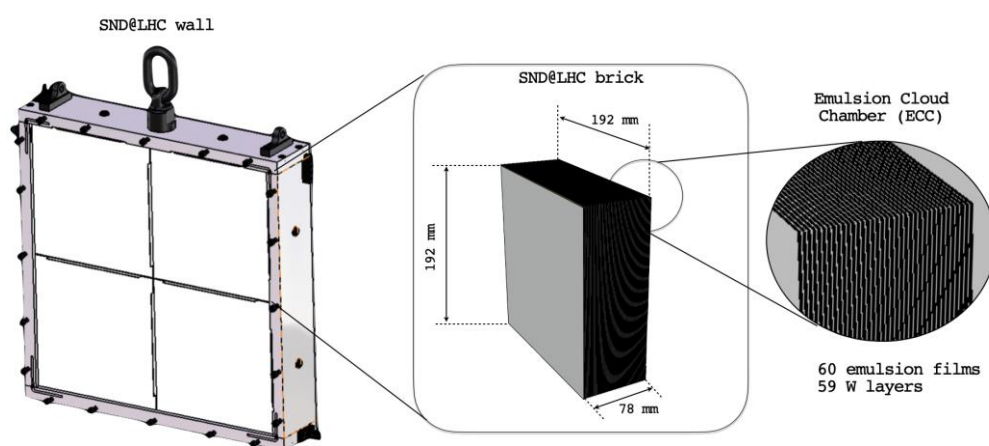
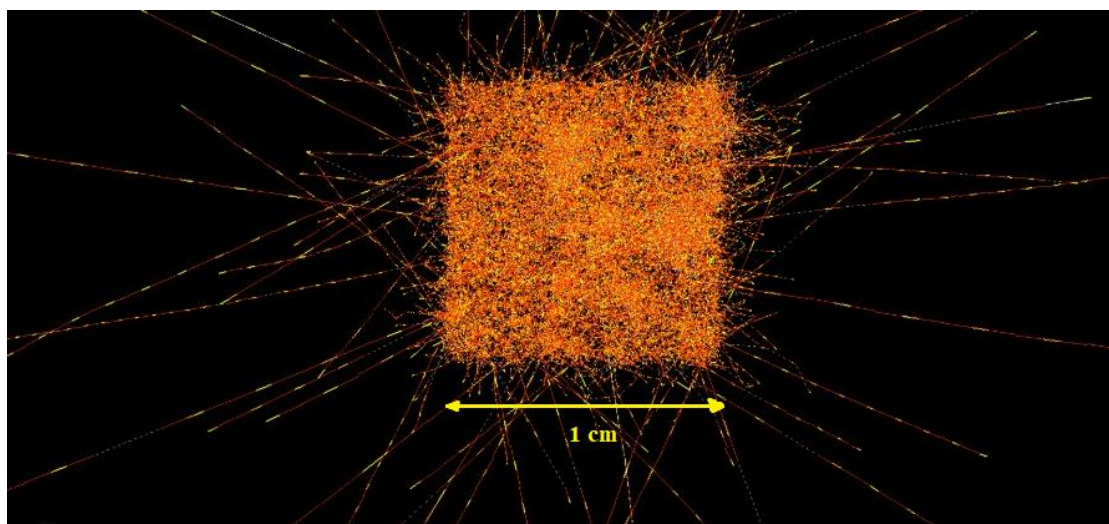


Рисунок 2.15 Схема одной стенки нейтринной мишени эксперимента SND@LHC.

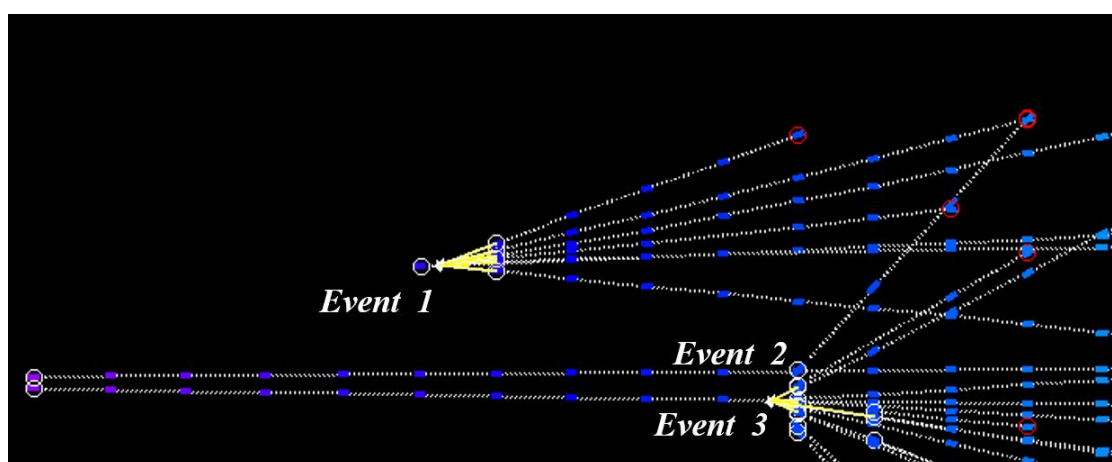
За каждой из пяти стенок мишени расположен детектор из сцинтилляционных волокон SciFi. Использование SciFi позволяет локализовать положение нейтринного взаимодействия в эмульсионном блоке и связать реконструированный в эмульсии мюонный трек с треком, зарегистрированным мюонным детектором, расположенным за нейтринной мишенью. Система идентификации мюонов состоит из железных плит, чередующихся с детекторами из сцинтилляционных стержней. Сочетание SciFi и сцинтилляторов мюонного детектора (адронный калориметр) служит также для измерения энергии адронной струи, образующейся в нейтринных взаимодействиях, и, следовательно, энергии нейтрино. Суммарная длина детектора составляет около $11 \lambda_{\text{int}}$, что обеспечивает хорошее развитие адронных ливней.

Проявка облученных эмульсий нейтринной мишени проводится в химической лаборатории ЦЕРН, оснащенной необходимым оборудованием для обработки 1200 эмульсионных пленок в неделю. Просмотр проявленных эмульсий осуществляется на оптических микроскопах пяти специализированных сканирующих лабораторий, в результате чего время обработки экспериментальных данных сопоставимо со временем экспозиции. Сканирование проводится в лабораториях университетов Болоньи, Гран Сассо, Неаполя, университета Сантьяго, недавно созданной лаборатории в ЦЕРН, Физического института им. Лебедева РАН (ЛЭЧ), скорость обработки эмульсий на автоматизированных оптических микроскопах достигает $\sim 190 \text{ см}^2/\text{ч}$.

Реконструкция события осуществляется в два этапа. На первом этапе обрабатываются данные целеуказаний электронных детекторов; затем производится сканирование и физический анализ эмульсионных данных. Алгоритм реконструкции событий в ядерных эмульсиях SND@LHC эксперимента идеологически аналогичен разработанному для эксперимента OPERA, однако плотность треков на единицу площади SND@LHC эксперимента на порядки превышает плотность треков эксперимента OPERA в эмульсионном детекторе, что привело к существенной модернизации алгоритма как для реконструкции треков, так и для поиска вершин взаимодействия. На рисунке 2.16 показан пример реконструкции треков и вершин взаимодействий эмульсионного детектора сеанса RUN1. Так, рис. 2.16 а) демонстрирует плотность треков на площади 1 см^2 , сеанс облучения RUN1, в то время как на рис. 2.16 б) представлены вершины трех взаимодействий, реконструированных в данном объеме, одно из которых (Event 1) не имеет первичного трека, по предварительным результатам, взаимодействие нейтрино.



а)



б)

Рисунок 2.16 Результат реконструкции одного из кирпичей RUN1: а) – всех ОТ, пересекающих 1 см^2 ; б) вершин взаимодействий на 1 см^2 , удовлетворяющих критериям отбора топологии событий.

Согласно оценкам, эмульсии позволяют анализировать изображения и восстанавливать события при максимальной плотности треков до 10^7 см^2 , однако при столь высокой плотности прослеживание треков в мишени сопровождается серьёзными техническими трудностями. В результате оптимальным считается уровень облучения порядка 10^5 треков/ см^2 . Поэтому, учитывая оценки фона в ТП18, экспозиция эмульсии в одном сеансе облучения не должна превышать 30 fb^{-1} , что означает замену эмульсионных кирпичей примерно три раза в год при непрерывной работе ускорителя.

В настоящее время осуществлено 15 экспозиций. Первая экспозиция проводилась с целью тестирования конструкции и качества сборки нейтринного

детектора, и поэтому имела самую маленькую загрузку $0,5 \text{ fb}^{-1}$. Со второй по шестую экспозиции облучалась мишень в полной сборке: 5 стенок по 4 кирпича, содержащих по 60 эмульсионных слоев, что составляет 1200 эмульсий за один сеанс, а все последующие мишень наполнялась наполовину: 5 стенок по 2 кирпича, содержащих по 60 эмульсионных слоев, что составляет 600 эмульсий за сеанс ввиду большой интегральной светимости на пучке ускорителя, но с более частой заменой. Начиная с третьей экспозиции, нейтринный детектор регистрировал данные синхронно с электронными детекторами.

Диаграммы на рисунке 2.17 показывают набор интенсивности сеансов RUN0 – RUN14.

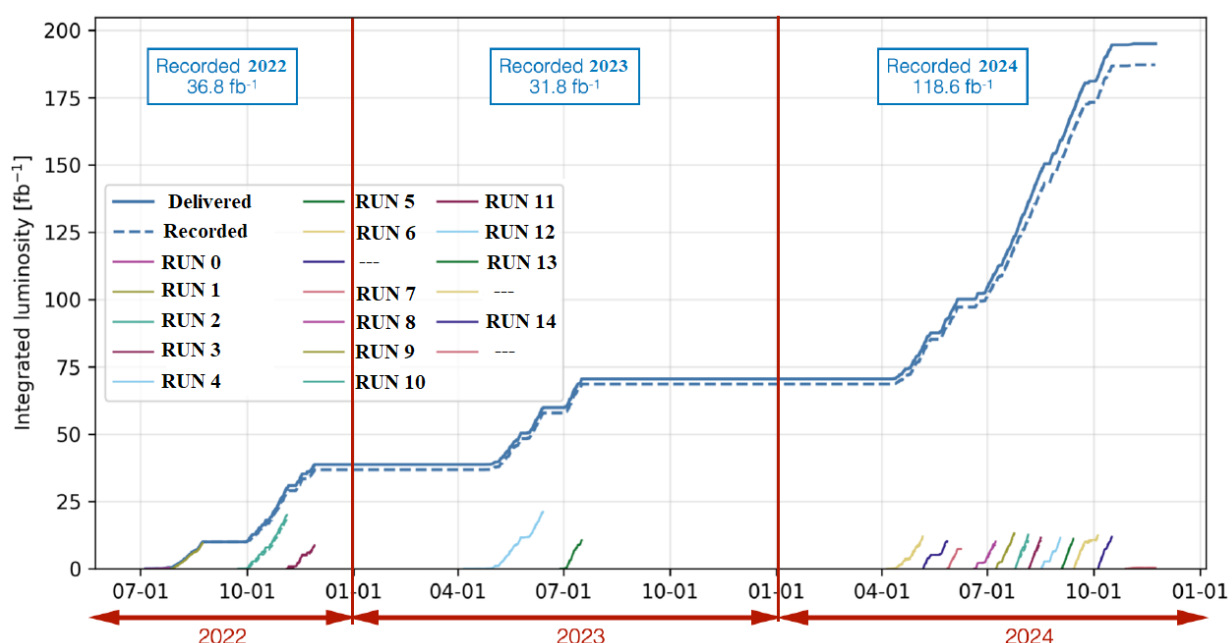


Рисунок 2.17 Интенсивность облучения, набранная в течение 2022 - 2024 гг. По оси X показаны даты проведения сеанса, по оси Y – набранная во время экспозиции загрузка, так называемая интегральная светимость [61].

Производство ядерной фотоэмульсии для наполнения мишени нейтринного детектора обеспечивается двумя производителями: университет Университет Нагойя, Япония и ООО “СЛАВИЧ”, г. Переславль-Залесский, Россия. Мониторинг качества российской эмульсии перед отправкой в ЦЕРН проводился автором работы [62–64]. Наполнение нейтринного детектора эмульсионными слоями в каждой экспозиции, временные интервалы сеансов

облучения, масса мишени, а также набранная интегральная светимость представлены в таблице 2.3.

RUN ID	Дата начала сеанса	Дата окончания сеанса	Масса мишени, кг	Интегральная светимость, fb^{-1}
RUN 0	07.04.2022	26.07.2022	39	0,46
RUN 1	26.07.2022	13.09.2022	807	9,5
RUN 2	13.09.2022	04.11.2022	784	20,0
RUN 3	04.11.2022	09.12.2022	792	8,6
RUN 4	20.03.2023	23.06.2023	797	21,2
RUN 5	23.06.2023	27.07.2023	784	10,7
RUN 6	20.03.2024	06.05.2024	797	12,0
RUN 7	27.05.2024	13.06.2024	392	7,3
RUN 8	13.06.2024	08.07.2024	392	10,1
RUN 9	08.07.2024	24.07.2024	392	13,3
RUN 10	24.07.2024	05.08.2024	392	12,7
RUN 11	05.08.2024	16.08.2024	392	11,5
RUN 12	16.08.2024	02.09.2024	392	11,5
RUN 13	02.09.2024	13.09.2024	392	11,1
RUN 14	01.10.2024	21.10.2024	392	11,8

Таблица 2.3 Технические характеристики сборки нейтринного детектора, экспозиции RUN0 – RUN14 [65].

Из данных, приведенных в таблице 2.3, видно, что часть сеансов RUN1, RUN3, RUN5-RUN14 имеют набранную интегральную светимость $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$, что соответствует $\sim 10^4 \div 10^5$ треков/ cm^2 , а для сеансов RUN2, RUN4 интегральная светимость $\sim 20 \div 30 \text{ fb}^{-1}$ и заполнение эмульсии достигает в этом случае $\sim 10^5 \div 10^6$ треков/ cm^2 , что потребовало модернизации существующего алгоритма обработки. В настоящее время идет интенсивная работа с непосредственным участием автора по модернизации алгоритма реконструкции треков и его ручного тестирования, т.е. выполняются различные проверки работы как целого кода, так и отдельных его подпрограмм на наличие/отсутствие ошибок или

неожиданного поведения, для последующего их исключения. Отладка исходного кода уже проведена для RUN1 и идет аналогичная работа для экспериментальных результатов RUN3 с максимальной плотностью треков на единицу объема. После ручной проверки и отладки кода, последующая обработка будет проводиться в автоматическом режиме на серверах ЦЕРН. Данное ручное тестирование выполняется тремя членами коллаборации SND@LHC, включая автора диссертационной работы. Использование нового алгоритма реконструкции треков позволило увеличить точность определения положения микротреков до 0,2 мкм, а угловое разрешение до 1,2 мрад (что примерно в 10 раз лучше, чем при сканировании эмульсий OPERA) и увеличить скорость обработки эмульсионных данных без изменения комплектующих сканирующих станций.

Положение детектора относительно линии пучка соответствует схеме на рисунке 2.18а, однако в 2025 году планируется разместить детектор симметрично относительно оси пучка, как показано на рисунке 2.18б.

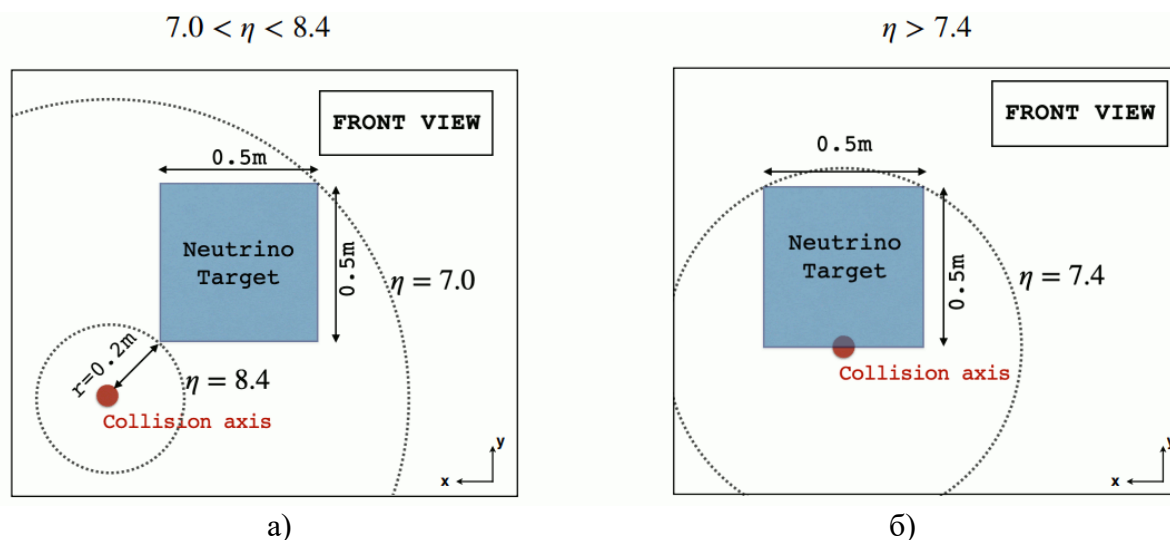


Рисунок 2.18 Схематическое изображение нейтринного детектора SND@LHC относительно оси пучка, вид спереди: а) во время экспозиций RUN1÷RUN14, б) предполагаемое положение при последующих экспозициях [43].

Такой сдвиг приведет к большим энергиям нейтрино (200÷400 ГэВ), что, в свою очередь, увеличит более чем в 4 раза статистику выхода электронных и мюонных нейтрино (см. рисунок 2.19). При этом исследования переместятся в область псевдобыстрот $\eta > 7,4$.

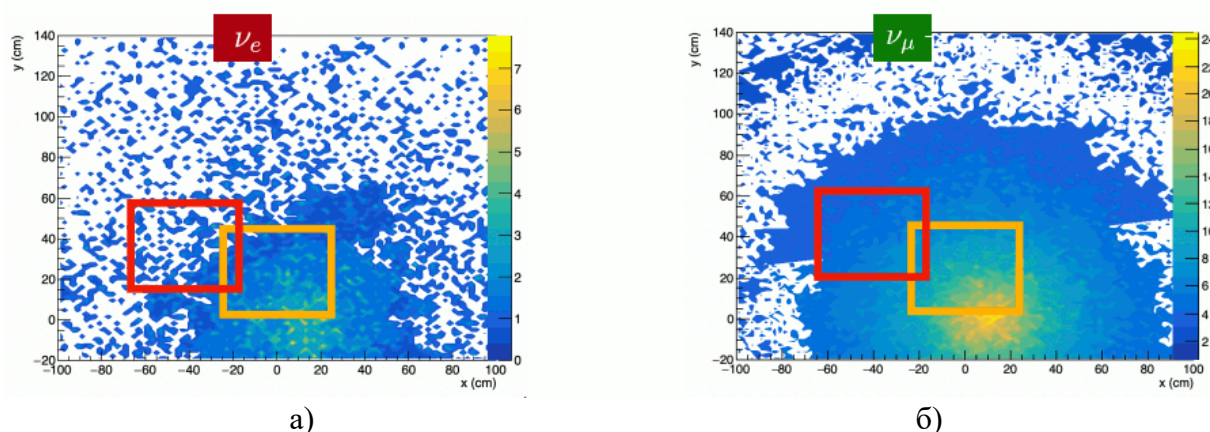


Рис. 2.19 Схематическое изображение нейтринного детектора SND@LHC относительно оси пучка, вид спереди. Цветовая шкала отображает ожидаемое число взаимодействий ν_e и ν_μ для а) экспозиций RUN1÷RUN5, б) последующих экспозиций [66].

В настоящее время эксперимент SND@LHC находится в стадии активного набора данных. Сканирование эмульсионных “кирпичей” ведется параллельно в лабораториях нескольких стран, входящих в состав коллаборации. Проводится моделирование отклика каждой из компонент детектора с помощью программных пакетов DPMJET-III [67] и Pythia8+FLUKA [68] и осуществляется разработка и тестирование системы сбора и хранения информации на одном из серверов ЦЕРН. Последующие экспозиции нейтринного детектора в области псевдобыстрот $\eta > 7,4$ и диапазоне энергий 200÷400 ГэВ позволят увеличить выход ν_e и ν_μ – взаимодействий более чем в 4 раза.

В 2022 году было зарегистрировано первое событие осцилляции нейтрино при столкновении протонов на БАК. Схема развития сигнала, отображающего данное событие электронной частью нейтринного детектора SND@LHC, представлена на рисунке 2.20. В эксперименте SND@LHC было отобрано 8 кандидатов на события с образованием мюонных нейтрино ν_μ по каналу заряженного тока CC (Charged Current), зарегистрированных электронными приборами детектора. Статистическая значимость для отобранных событий составила приблизительно семь стандартных отклонений. В настоящее время осуществляется анализ эмульсионных данных (сканирование эмульсионных пластин, имплементация нового алгоритма реконструкции треков, реконструкция в тестовом режиме с использованием нового алгоритма, физический анализ).

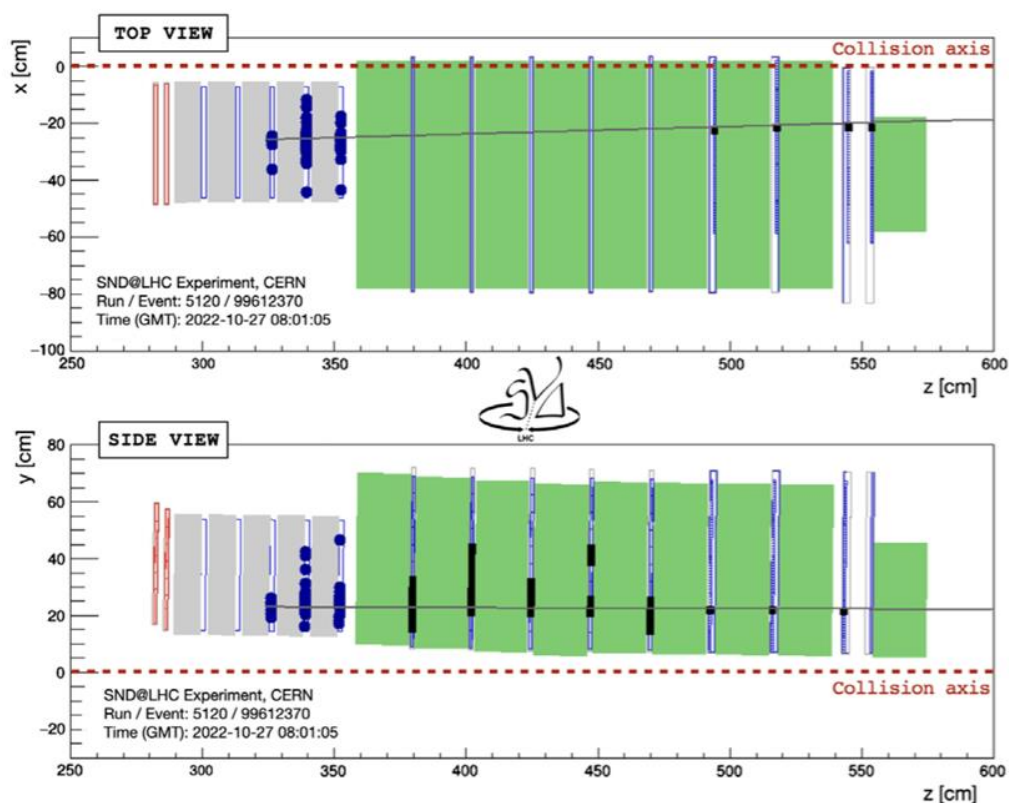
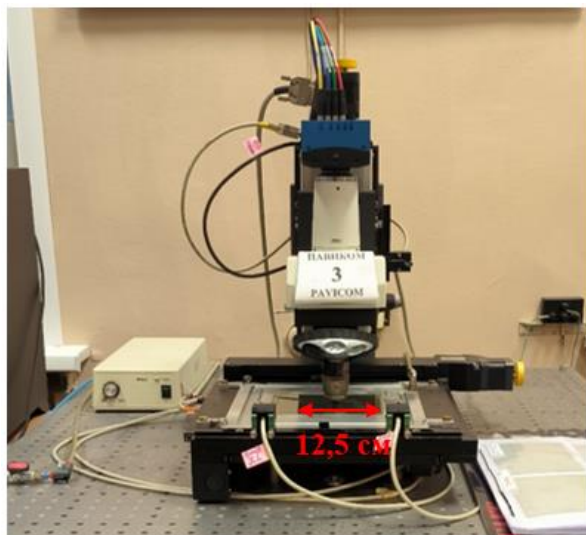


Рисунок 2.20 Взаимодействие нейтрино по заряженному току ν_μ CC в нейтринном детекторе SND@LHC. Сигналы от SciFi и адронного калориметра показаны синими и черными точками, соответственно. Черная линия представляет восстановленный трек образовавшегося мюона в мюонном детекторе.

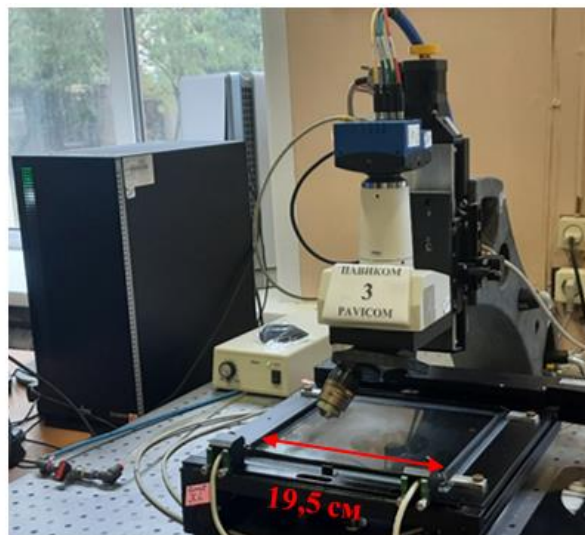
Опубликованы первые результаты эксперимента SND@LHC, полученные в 2022 г [9], указывающие на перспективность дальнейших исследований в мало изученной области энергий нейтрино от 350 ГэВ до 10 ТэВ и представляющие большой интерес для изучения нейтринных аномалий на материале с высоким статистическим обеспечением [69].

В экспериментах масштаба SND@LHC, где осуществляется обработка больших объемов эмульсионных пластин, ~ 1200 эмульсионных слоев за один сеанс облучения, 3÷4 сеанса на ускорителе в год, необходимо достаточное количество современных измерительных систем, сканирующих двусторонние эмульсии с высокой скоростью. В настоящее время в сканировании эмульсий SND@LHC детектора задействованы целый ряд лабораторий в различных странах: Италия (г. Неаполь, г. Болонья, г. Гран Сассо), Швейцария (ЦЕРН), Япония (Нагойя), Чили (Сантьяго), Россия (ФИАН, Москва).

Начиная с первого сеанса облучения в ЦЕРН эмульсионных детекторов SND@LHC ФИАН принимает активное участие в сканировании и обработке экспериментальных данных эксперимента. С этой целью в 2022 году была произведена замена предметного столика на сканирующей станции ПАВИКОМ-3 под размер эмульсии, используемой в SND@LHC, см. рис. 2.21



а)



б)

Рисунок 2.21 Фото сканирующего комплекса ПАВИКОМ-3: а) размер предметного столика $10,0 \times 12,5 \text{ см}^2$; б) размер предметного столика $19,5 \times 19,5 \text{ см}^2$.

На рисунке 2.22 представлены результаты первого перекрестного сканирования фотоэмульсионных слоев российского производителя, сеанс облучения -RUN1 для двух соседних эмульсионных детекторов, обработанных в лаборатории ФИАН (Москва, Россия, сканирующая станция ПАВИКОМ-3) и в лаборатории университета Федерико II (Неаполь, Италия, европейская сканирующая станция MIC-2) соответственно.

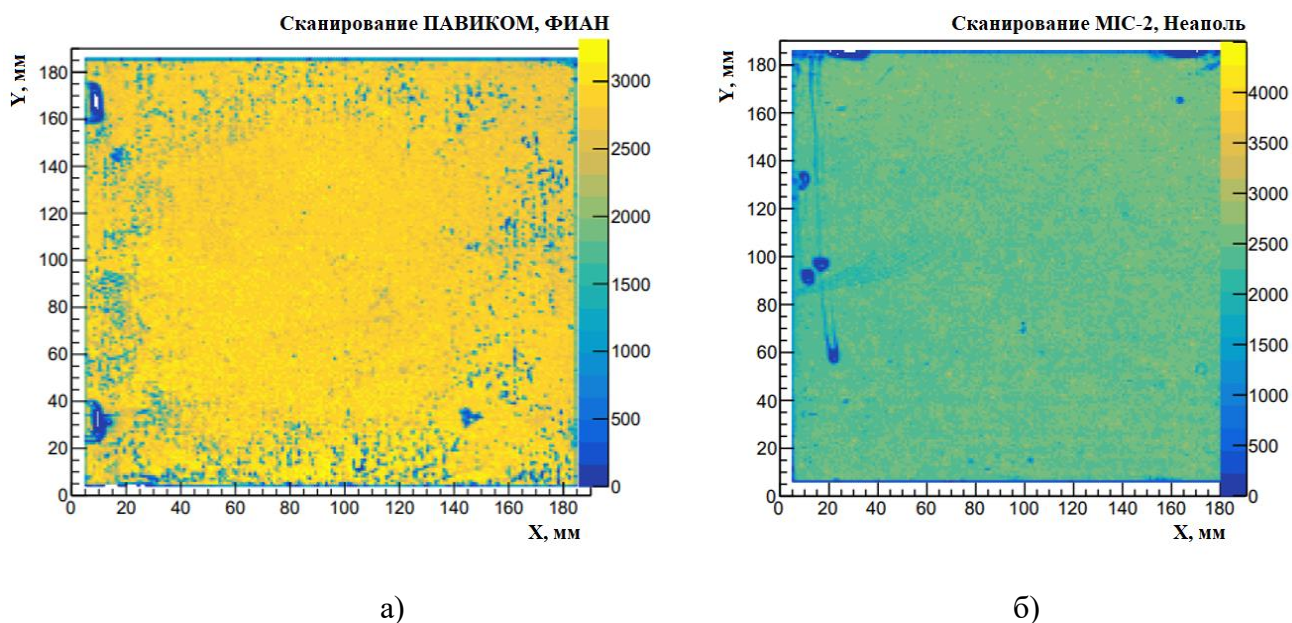


Рисунок 2.22. Двумерное распределение восстановленных микротроек на всей площади эмульсионной пластины SND@LHC эксперимента размером 190×190 мм² с техническим отступом при сканировании, размером 5 мм. Цветовая шкала отображает число микротроек на 1 мм² : а) сканирование в лаборатории ФИАН, Москва, Россия, Run1, детектор 1, эмульсия 1; б) сканирование в лаборатории университета Федерико II, Неаполь, Италия на европейской сканирующей станции, Run1, детектор 2, эмульсия 1.

Восстановленные в процессе сканирования микротреки, представленные на распределениях рисунка 2.22 демонстрируют высокое качество произведенной эмульсии российского производителя. Число восстановленных треков на единицу площади, равную одному квадратному миллиметру, составила ~ 3000 треков в обоих случаях.

В 2024-2025 гг произведена модернизация [41] программного и аппаратного обеспечения ПАВИКОМ-1. В начальной конфигурации ПАВИКОМ-1, собранный в 2000 году, включал прецизионный стол фирмы MICOS с массивной платформой и подвижный предметный стол размером 500×800 мм (см. рис. 2.1). Точность перемещения предметного стола составляет 0,5 мкм по всем осям. Виброустойчивость стола обеспечивается его массой ~ 1 т. Для уменьшения теплового расширения кронштейн для крепления микроскопа выполнен из гранита. Модернизированное в 2024 году управление предметным столом осуществляется с компьютера (до модернизации: в ручном режиме с помощью джойстика). В процессе модернизации над столом был 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 в 2024 году был 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 была разработана при сотрудничестве ФИАН с Национальным институтом ядерной физики Италии (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN).

Размеры стола ПАВИКОМ-1 позволяют разместить на его поверхности восемь слоёв ядерной эмульсии из детектора SND@LHC, что дает возможность существенно сократить время обработки при перезапуске процесса сканирования, требующем участия оператора. В ходе модернизации произведено подключение контроллера управления столом ПАВИКОМ-1 к основному компьютеру, осуществляющему управление модулями сканирования, при этом команды управления столом были интегрированы в основной программный код LASSO; смонтирована и подключена новая высокоскоростная видеокамера с оптической системой и осуществлена отладка работы сканирующего микроскопа по результатам модернизации.

Таким образом, проведённая модернизация перевела ПАВИКОМ в разряд сканирующих лабораторий для обработки данных эксперимента SND@LHC в необходимом режиме наравне с другими действующими мировыми сканирующими лабораториями [42].

Глава 3. Методика мюонографических экспериментов на основе эмульсионных детекторов

3.1 Характеристики потоков атмосферных мюонов

Идея использования космического излучения для «просвечивания» крупных объектов под землей и на земной поверхности впервые была предложена академиком П.П. Лазаревым в 1926 году [70]. Однако мюон, как частица, наиболее подходящая по своим характеристикам для такого просвечивания, был открыт позже - в 1936 году. Практическое использование метода мюонографии началось с 1955 года [71]. Сложность применения электронных детекторов (например, необходимость подвода электропитания, дежурства персонала во время экспозиции, значительные размеры детектора и др.) существенно ограничивала возможности метода. Ренессанс метода мюонографии, наблюдаемый в последние годы, во многом связан с прогрессом в технике экспериментов с ядерными фотоэмульсиями [30,40]. Создание высокотехнологичных автоматизированных микроскопных комплексов решило проблему сканирования фотоэмульсий и успешной обработки больших объемов экспериментальных данных [72,73]. Теперь одна такая сканирующая станция способна за секунду обрабатывать десятки тысяч треков в каждом слое ядерной фотоэмульсии, на что при визуальной обработке эмульсий требовались годы измерений.

Высокая интенсивность у поверхности Земли (около 10000 мюонов на квадратный метр в минуту) потоков атмосферных мюонов с большой проникающей способностью дает возможность изучать крупные природные и промышленные объекты методом мюонографии и получать 3D-изображения их внутренней структуры, подобно тому, как получают снимки при рентгенографии [36].

Метод мюонографии основан на сравнении степени поглощения потока мюонов космического происхождения, составляющих около 80% всех наблюдаемых частиц космического излучения на уровне моря, разными частями изучаемого объекта. Мюонографический детектор должен быть установлен

ниже или сбоку исследуемого объекта, длительность экспозиции (от 7 дней до 8 месяцев) определяется условиями проведения измерений, прежде всего, глубиной размещения детектора. В случае необходимости экспозиции длительное время с переходом в разные сезоны следует принимать во внимание временные вариации потока мюонов, зависящие от активности Солнца (сезонные, одиннадцатилетние, яркие вспышки и т.д.), влияющие на энергетический спектр космических мюонов с энергией до нескольких ГэВ. Также величина потока космических мюонов может иметь вариативность в зависимости от места наблюдения на земной поверхности и обусловлена магнитным полем Земли, по-разному отклоняющим мюоны на разных широтах. Существует целый ряд экспериментов по измерению потока мюонов, выполненных при различных условиях (время, географическое положение, углы наблюдения) различными методами [74–78].

В данной работе в модельных расчётах, выполненных для всех реализованных мюонографических экспериментов был использован поток мюонов по данным работы [79].

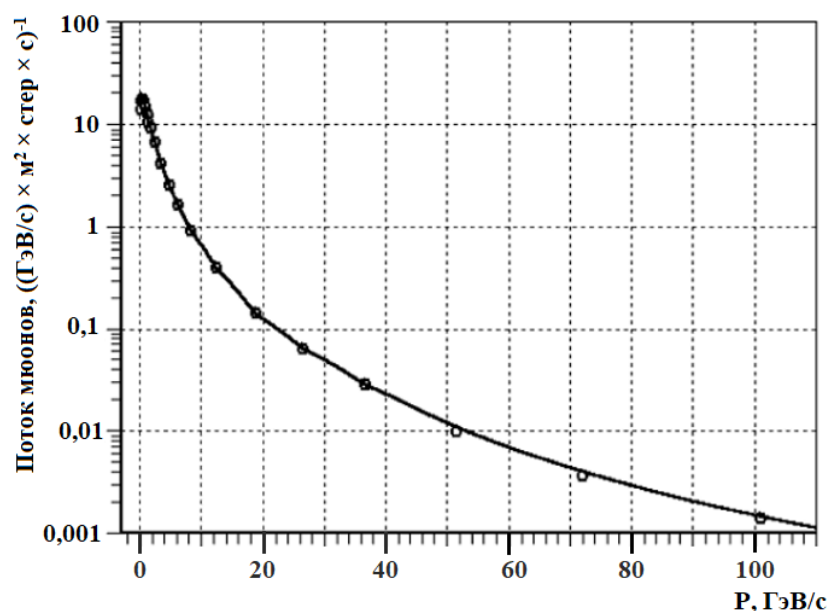


Рисунок 3.1. Дифференциальный поток $F(P)$ положительных мюонов; незакрашенные круги — экспериментально измеренные величины, сплошная кривая — аппроксимирующая их функция $F(P) \sim P^{-2,7}$.

На рисунке 3.1 точками показаны результаты измерения потока положительных мюонов [79]. Измерения выполнены вблизи озера Линн, Манитоба, Канада ($56,5^\circ$ северной широты, $101,0^\circ$ западной долготы), на высоте 360 м над уровнем моря. Диапазон величин импульсов частиц, измеренных в эксперименте $0,2 \div 120$ ГэВ/с [80]. Спектр высокоэнергичных мюонов с импульсом в диапазоне от нуля до 100 ГэВ/с имеет степенную зависимость $F(P) \sim P^{-2,7}$ (рис. 3.1). Однако, реальный спектр мюонов простирается до сотен ТэВ/с. Мюоны с такими импульсами способны проникать на глубины до двух километров скального грунта. Проинтегрированная по импульсу величина вертикального потока положительных мюонов составила $43 \text{ (м}^2 \times \text{стер} \times \text{с)}^{-1}$, для двух зарядов, соответственно, данная величина $\sim 90 \text{ (м}^2 \times \text{стер} \times \text{с)}^{-1}$.

Зависимость потока мюонов от зенитного угла, в основном, определяется величиной пройденного мюоном в атмосфере пути и может быть приближенно описана функцией $F(\theta) \sim \cos^2(\theta)$ [81].

Основные потери энергии для мюонов с $P < 100$ ГэВ/с приходится на ионизацию атомов и могут быть описаны формулой Бете-Блоха, дополненной рядом поправок [82]. Для мюонов с $P > 100$ ГэВ/с становятся важными радиационные потери.

При прохождении через объект часть мюонов замедляется настолько, что останавливается в нем. Это означает, что существует некоторое значение минимального импульса, при котором мюоны с меньшим импульсом остановятся в объекте, а с большим - пройдут через него. Величина минимального импульса зависит от целого ряда параметров: материала объекта, его размера и величины пробега мюона в данном веществе. Такие расчеты приведены в работе [83] и успешно использовались нами в модельных расчетах прохождения потоков мюонов через реальные объекты с целью оценки ожидаемых выходов частиц, прошедших по разным направлениям [10,84–93].

Потоки мюонов на поверхности Земли можно измерять до очень больших зенитных углов, вплоть до $\theta=90^\circ$, однако большинство измерений потока космических мюонов в мюонографических работах других авторов проводилось для вертикального направления. Специфика исследования объектов культурного наследия (невозможность размещения детекторов на большой глубине из-за запрета на проведение раскопок) в данной диссертационной работе предполагала чаще всего измерения мюонов, приходящих под углами $60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Исследованиями таких малоизученных околоризонтальных потоков мюонов занимаются немногие научные группы, важные результаты были получены, например, на уникальной установке НЕВОД [94] и представлены на рис.3.2.

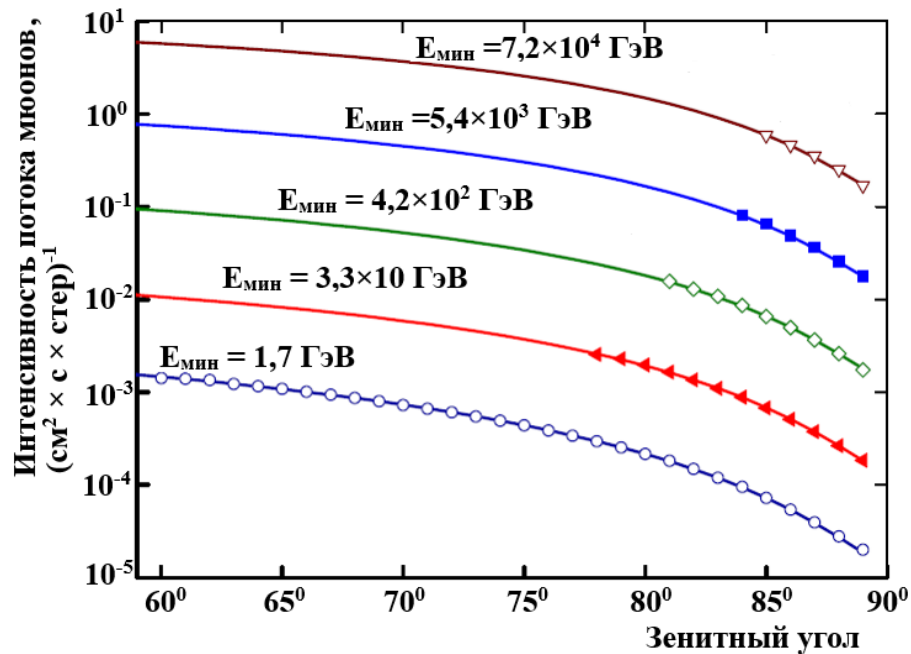


Рисунок 3.2 Зависимость интегральной светимости мюонов от зенитного угла θ для нескольких значений $E_{мин}$. Символы – экспериментальные данные, линии – аппроксимация.

Данные, представленные на рисунке 3.2, демонстрируют высокую точность совпадения с аппроксимирующей кривой, рассчитанной по формуле:

$$I_{app}(\theta, E_{min}) = \frac{C_I}{E_1^\gamma} \cdot \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma+1} \cdot \frac{E_{cr}}{E_1 + a \cdot h_1} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_1 \cdot \cos\theta^*}\right)\right),$$

где множитель перед экспонентой отражает форму интегрального энергетического спектра мюонов в верхних слоях атмосферы, а экспоненциальный фактор учитывает распад мюонов.

C_I – нормировочный коэффициент, $E_1 = E_{min} + a \cdot (h_0 / \cos\theta^* - h_1)$ – энергия мюона на уровне генерации (ГэВ), $a = 2,5 \times 10^{-3} \text{ ГэВ/см}^2$ – эффективные удельные потери энергии, $(h_0 / \cos\theta^* - h_1)$ – путь, пройденный мюоном до установки, $h_0 = 1018 \text{ г/см}^2$ – полная толщина атмосферы с учетом высоты над уровнем моря, $h_1 = 100 \text{ г/см}^2$ – эффективная глубина генерации мюона, $E_{cr} = z_0 \cdot m / (c \cdot \tau_0 \cdot \cos\theta^*)$ – эффективная критическая энергия мюона, z_0 – эффективная длина, на которой плотность атмосферы меняется в e - раз, c – скорость света, τ_0 – время жизни мюона, m – его масса в ГэВ, $\cos\theta^* = (\cos^\alpha\theta + \Delta^\alpha)^{1/\alpha}$ – аппроксимация влияния сферичности атмосферы; в результате фитирования экспериментальных данных получены следующие параметры: $C_I = 0,103$, $\gamma = 1,963$, $z_0 = 6,81 \text{ км}$, $\Delta = 0,0577$ и $\alpha = 1,35$.

Данная аппроксимация может быть полезна в экспериментах, где необходимо учесть зависимость интенсивности потоков мюонов с большими зенитными углами от их энергии.

Таким образом, проходя через области с разной плотностью вещества и испытывая при этом разную степень поглощения, потоки заряженных мюонов несут информацию об особенностях внутреннего строения объектов, сквозь которые они прошли. Аномалии угловых распределений треков зарегистрированных частиц могут указывать на наличие в определённом направлении областей, отличающихся по плотности от основного вещества (пустот или инородных включений). Экспериментальные результаты полномасштабных авторских экспериментов, проведенных методом мюонографии детально представлены в главе 4.

3.2 Реконструкция треков в мюонографических экспериментах с фотоэмульсией в качестве трекового детектора

3.2.1 Используемое программное обеспечение

К современному программному обеспечению на сканирующих станциях нового поколения предъявляются весьма жесткие требования, связанные, главным образом, с необходимостью проводить измерения с максимально высокой точностью и скоростью. Обработка изображений в режиме реального времени, т.е. непосредственно во время сканирования, дает возможность получить результат обработки практически сразу по завершению сканирования, а также позволяет изменить параметры системы сканирования с учетом полученных результатов обработки только что полученных данных (системы с обратной связью), например, для отслеживания поверхности эмульсии и корректировки области сканирования. Использование распределенных вычислений делает систему сканирования масштабируемой, позволяя решать различные подзадачи на специализированных узлах сети, тем самым освобождая ресурсы рабочей станции, контролирующей сканирование.

При сканировании и реконструкции треков на установке ПАВИКОМ используются два программных пакета. Первый из них, PAVICOM, разработан в Лаборатории элементарных частиц ФИАН [26,27,95], одним из разработчиков которых является автор [28]. При сканировании на установке ПАВИКОМ в автоматическом режиме выполняются следующие действия:

1. работа с координатами поля зрения: перемещение стола в плоскости, перпендикулярной оптической оси; перемещение объектива вдоль оптической оси; считывание координат поля зрения;
2. работа с видеоизображением: вывод на экран изображения поля зрения микроскопа с помощью видеокамеры; считывание координат нужного пикселя на поле зрения;
3. обработка изображения и распознавание образов: сохранение и обработка изображений; распознавание образов, т.е. определение пространственных

характеристик и анализ микротреков частиц (МТ) – следов в каждом одном из двух эмульсионных слоев.

Второй пакет, FEDRA (Framework for Emulsion Data Reconstruction and Analysis), используется на LINUX-сервере в Offline режиме. Пакет был создан для обработки данных эксперимента OPERA, в котором автор, как член этой международной коллаборации, участвовал в его отладке при анализе эмульсионных данных [28,96]. Пакет FEDRA написан в виде набора библиотек для пакета ROOT и позволяет производить весь дальнейший цикл обработки и анализа: реконструировать базовые треки (БТ), взаимное расположение эмульсионных пластин в пространстве и объемные треки (ОТ) во всем объеме отсканированных данных, оценивать их импульс, искать вершины распадов, имеется возможность визуализации реконструированных данных [97]. Принципиальная схема онлайн (PAVICOM) и оффлайн (FEDRA) реконструкции треков представлена на рис. 3.3.

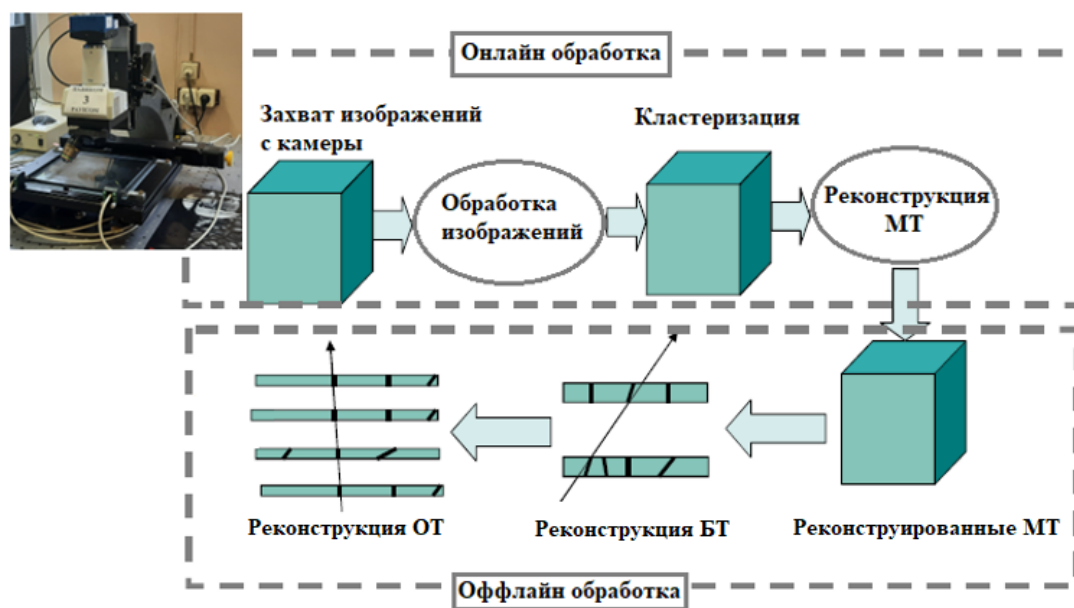


Рисунок 3.3 Блок-схема процессов онлайн и оффлайн обработки изображений и реконструкции треков.

На многоцелевом сканирующем комплексе ПАВИКОМ обрабатываются данные, полученные с использованием ядерных эмульсий, пластиковых детекторов, стекол, кристаллов оливинов из метеоритов. Ни одна аналогичная

установка в мире не используется для решения столь широкого класса задач [98]. При обработке данных международных экспериментов (OPERA, SND@LHC) используются коллаборационные стандартизированные для всех участников программные пакеты. Исследования в рамках различных российских программ, в частности, в мюонографических экспериментах, потребовало создания оригинальных авторских программных решений. Программное обеспечение ПАВИКОМ максимально гибкое и создано так, что при замене какой-либо аппаратной части или при расширении его функций требуются минимальные изменения исходного текста программы. Для реализации этих требований применён модульный подход к построению программного обеспечения. Он позволил инкапсулировать реализацию модулей: ни один модуль не зависит от работы и устройства других модулей. Таким образом, достигается необходимая гибкость при настройке программы, что придает ей способность производить сканирование для различных типов детектора и/или различных экспериментов. При этом все остальные модули программы, не зависящие от аппаратуры, останутся неизменными при различных вариантах настройки. Автором были реализованы специальные конфигурационные файлы, учитывающие специфику конкретного эксперимента и типа детектора, оставляя основной модуль программы сканирования неизменным. Он состоит из двух частей: независимой части, отвечающей за взаимодействие с другими модулями, и обработчика, зависящего от конкретного эксперимента, данные которого подлежат обработке. Использование подобных конфигурационных файлов существенно облегчает работу пользователя сканирующей станции, так как выставлены все параметры сканирования для данного типа детектора, оно, таким образом, минимизирует ошибочные настройки неопытного пользователя. Пример одного из таких конфигурационных файлов для сканирования двуслойных эмульсий в приложении I.

3.2.2 Распознавание изображений

Цикл обработки изображений на сканирующей станции ПАВИКОМ следующий: захват изображений с камеры, вычитание фона (устранение эффекта

битых пикселей и загрязнений на матрице камеры), фильтрация, бинаризация, кластеризация, поиск зерен и реконструкция МТ в эмульсионном слое.

Пример изображения на фиксированной глубине в эмульсии на выходе видеокамеры сканирующей станции ПАВИКОМ представлен на рисунке 3.4 а) и выглядит как группа зерен на сером фоне.

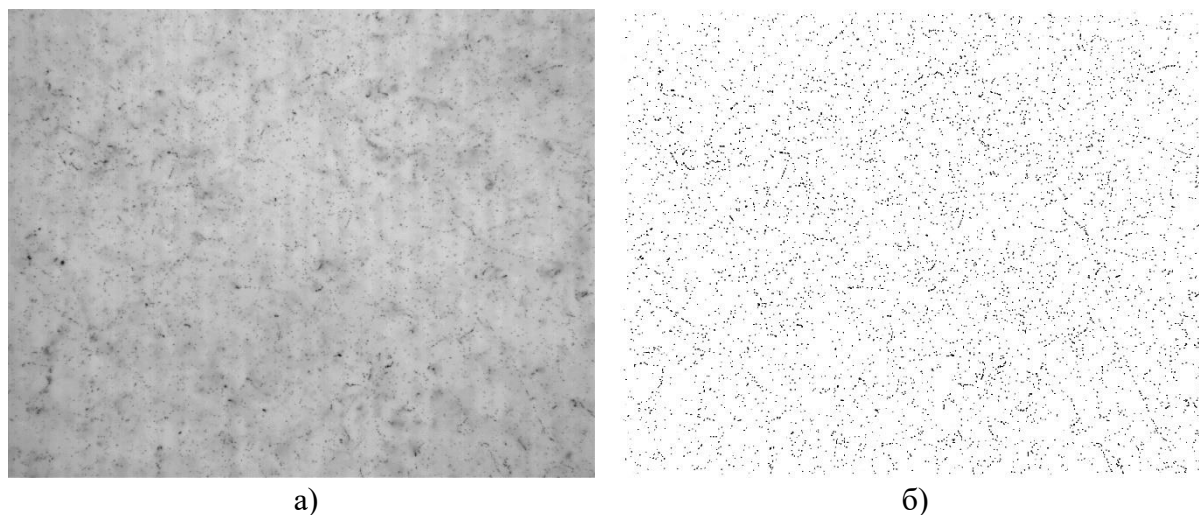


Рисунок 3.4 а) Исходное изображение 1280×1024 пикселей, полученное на измерительном комплексе ПАВИКОМ (размер поля зрения 800×600 мкм); б) кластеры, восстановленные с помощью графического процессора.

Предварительным этапом обработки изображения является определение и вычитание фона. С этой целью производится захват изображения в месте, где нет эмульсионного слоя, так называемого изображения плоского поля. Различные почернения на нем будут отвечать изображениям загрязнений на камере или битым пикселям, см. рисунок 3.5. В дальнейшем, при работе с реальными экспериментальными данными - для всех изображений, взятых в объеме эмульсионного детектора, производится процедура попиксельного вычитания изображения плоского поля.

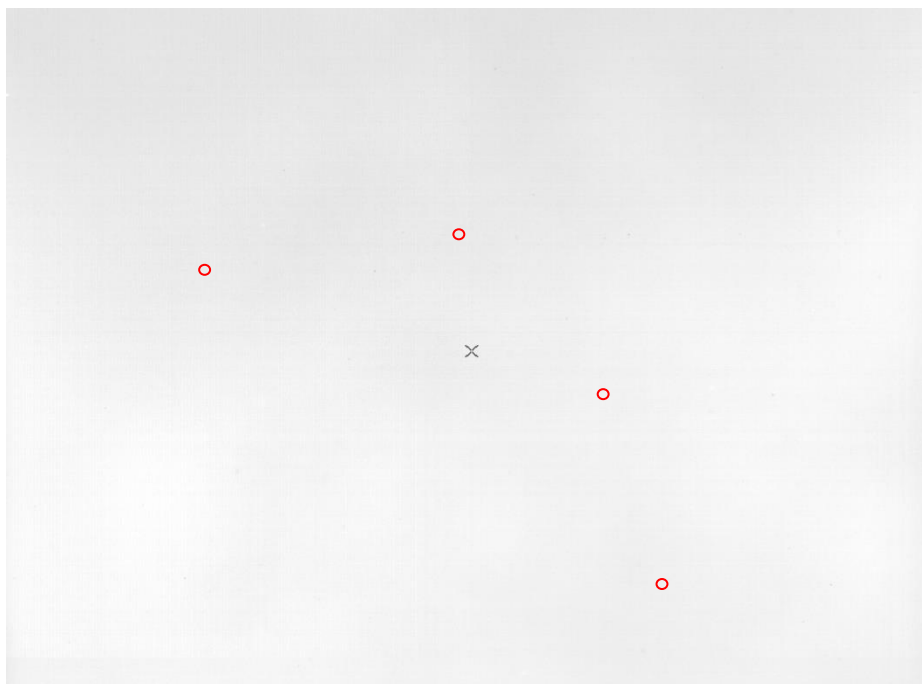


Рисунок 3.5 Изображение плоского поля, полученное на измерительном комплексе ПАВИКОМ, красными кругами отмечены пылинки на видеокамере, которые видны в объектив микроскопа и вычитаются из всех изображений.

Каждый пиксель изображения несет некоторую информацию о степени почернения изображения, называемую цветом. Для исходных изображений цвет пикселя лежит в диапазоне от 0 (черный) до 255 (белый). Фильтрация – это первая стадия обработки изображения. Ее цель – выделять пятна, которые отвечают изображениям отдельных зерен. В математическом отношении фильтрация представляет собой матричную операцию над цветами пикселей:

$$g_{i,j} = Tr F^T C_{i,j}$$

где $g_{i,j}$ – новый цвет пикселя (i,j) , F – матрица фильтра и $C_{i,j}$ – матрица, составленная из цвета пикселя (i,j) и цветов окружающих его пикселей так, чтобы цвет $g_{i,j}$ пикселя (i,j) был центральным элементом матрицы $C_{i,j}$. После операции фильтрации сигнал на изображении в том месте, где были зерна усиливается [99].

Бинаризация – это следующий этап обработки изображения, процесс выделения пикселей, которые соответствуют изображениям зерен, от всех остальных. На изображение накладывается пороговое ограничение: пикселям, цвет которых превышает значение порога, присваивается значение 1, остальным

присваивается цвет 0. С пикселями, которым присвоено значение 1, будет происходить вся последующая обработка.

Следующим этапом распознавания изображений является кластеризация – выделение связных областей. Соседние пиксели с цветом 1, выделенные в процессе бинаризации, объединяются в кластеры, которые отвечают пятнам почернения (зернам) в ядерной фотоэмульсии. Таким образом, кластер – это связное множество пикселей с цветом 1. Используется итеративная процедура выделения связных множеств. Зная координаты (x_i, y_i) каждого пикселя в кластере, можно найти центр масс, средний радиус и площадь кластера. Координаты центра кластера находятся по формулам:

В результате выполнения кластеринга появляется множество точек – центров масс кластеров на плоскости, отвечающей одной определенной глубине

$$\bar{x} = \frac{\sum c_i x_i}{c_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum c_i y_i}{c_i}$$

Однако перед тем, как из найденных кластеров реконструировать зерна, к имеющимся данным применяют коррекцию оптических искажений: преобразование координат центров кластеров и коррекцию наклона зерен. Каждое реальное зерно за счет конечности глубины фокуса видно, и реконструируется как кластер, на нескольких глубинах. При этом за счет оптических искажений, кластеры, находимые на разных глубинах и соответствующие одному зерну, находятся не вертикально друг под другом, а имеют некоторый систематический наклон, зависящий от положения зерна на поле зрения. Из кластеров, которые после коррекций оказались друг под другом, восстанавливаются зерна. Пример обработанного изображения после процедур бинаризации, кластеризации и коррекции оптических изображений показан на рисунке 3.4 б).

Алгоритм кластеринга на современных сканирующих станциях реализован на графическом процессоре (от англ. graphics processing unit, GPU) и

осуществляет поиск кластеров и нахождение их параметров, таких как координаты центра масс и степень почернения, см. рисунок 3.6.



Рисунок 3.6 Увеличенное изображение найденных кластеров в эмульсии, размер изображения 2480×1761 пикселей. Разные градации серого соответствуют разным кластерам.

Специфика алгоритма кластеринга значительно отличается от обработки изображений и требует значительного числа ветвлений, поэтому время реконструкции кластеров на одном поле зрения размером 500×600 мкм на кадр размером 1280×1024 пикселей составляет порядка 40 мс с использованием GPU.

Данный этап обработки был ускорен с использованием методики распознавания изображений с помощью нейросети. Под руководством автора студент группы ПАВИКОМ в процессе выполнения учебной исследовательской работы создал и провел обучение сверточной нейронной сети на архитектуре U-Net с обучающим набором изображений. Скорость обработки изображения и выделения кластеров с помощью нейросети после её обучения в пять раз превышает скорость обработки на графическом процессоре. Полученные результаты показали перспективность развития нового инструмента для данной задачи. В настоящее время идет работа над имплементацией данного этапа обработки изображений и выделения кластеров с помощью нейронной сети в программный комплекс

ПАВИКОМ; созданием и обучением сверточной нейронной сети на архитектуре 3D U-Net с использованием набора изображений, воспроизводящих трехмерный объект [100].

3.2.3 Реконструкция МТ и оценка качества сканирования

Реконструкция МТ является одной из самых ресурсоемких задач обработки в режиме реального времени в процессе сканирования. Основные этапы алгоритма микротрекинга представлены на рисунке 3.7.

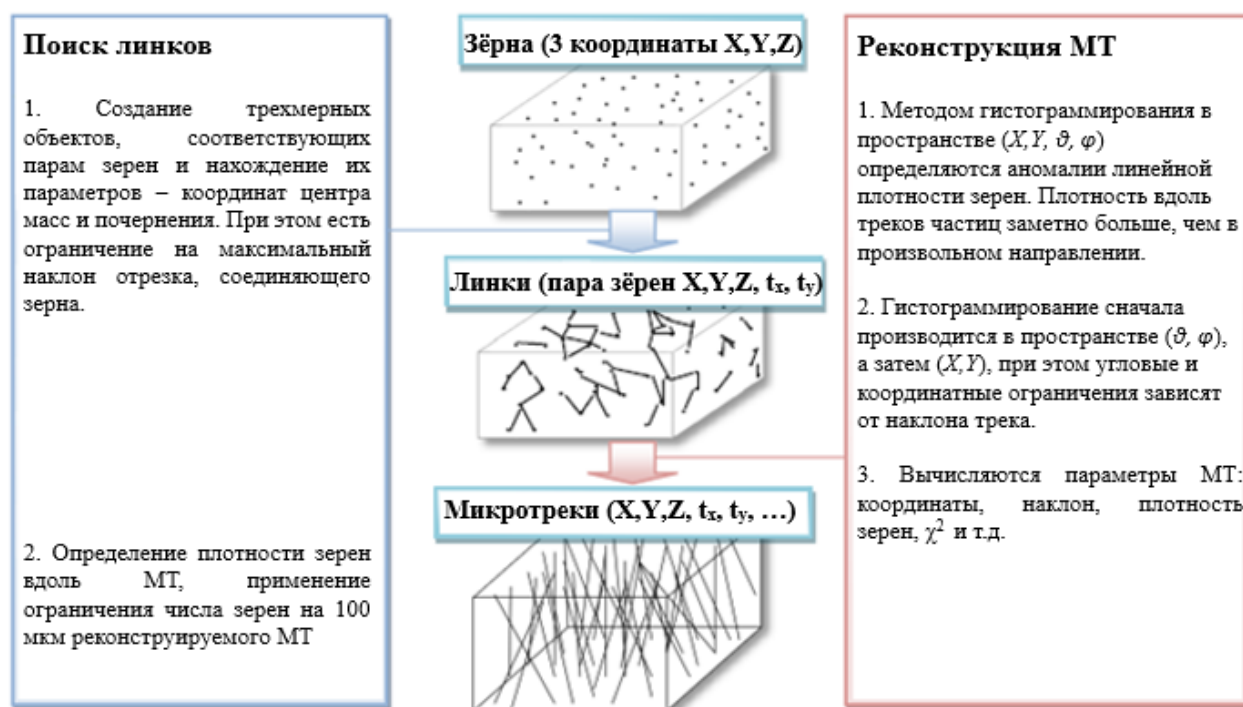


Рисунок 3.7 Этапы реконструкции МТ.

Первым этапом для построения микротреков является поиск линков, т.е. отрезков между всеми парами реконструированных зерен. При этом есть ограничение на максимальный наклон отрезка, соединяющего зерна, т.е. производится поиск линков – пар зерен, удовлетворяющих угловым ограничениям и ограничению на расстояние между ними. При ограничении на максимальный угол наклона линка 45° , зерна, находящиеся в цилиндре ошибок, заведомо находятся в окрестности 3×3 ячейки от этой точки, поиск производится по трем ячейкам, как это показано на рис. 3.8.

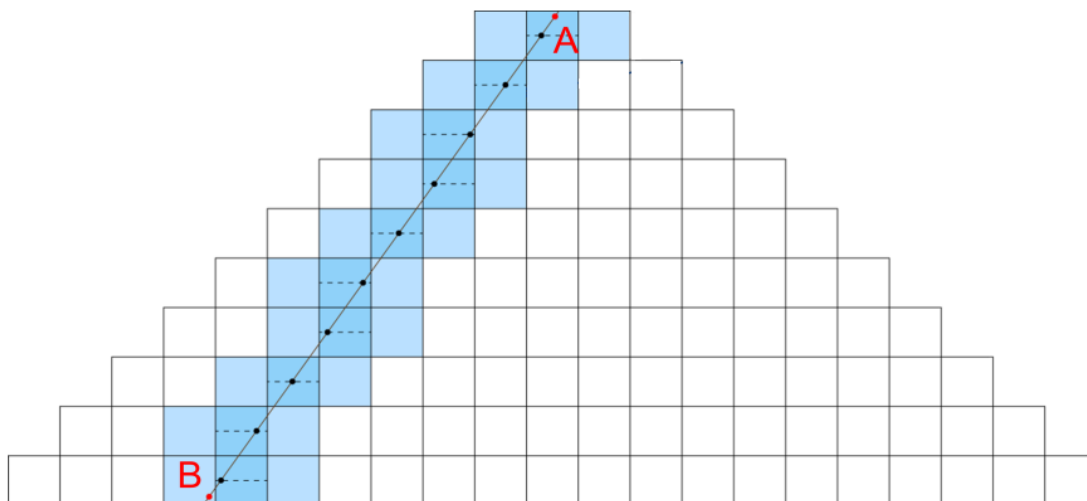


Рисунок 3.8 Область поиска зерен вокруг линка АВ.

Далее строятся четырехмерные гистограммы распределения количества линков от положения в пространстве координат линка X , Y и его наклона в пространстве. Пики на такой гистограмме соответствуют направлениям с высокой плотностью линков. Таким образом, выделяются те направления, в которых с большой вероятностью могут находиться микротреки. Вокруг этих направлений производится поиск зерен в цилиндре ошибок и вычисление параметров МТ.

Восстановление микротрека по цепочке кластеров - проведение прямой линии через известный набор координат центров их масс, решается методом наименьших квадратов [101]. Микротрек (цепочка кластеров), пересекающий плоскость ядерной фотоэмульсии, строится в соответствии со следующими общими требованиями: на каждой глубине внутри эмульсии (т.е. на плоскости кластеров) треку принадлежат не более одного кластера, расстояние между двумя последовательными кластерами не должно превышать заданного значения; число кластеров в МТ должно быть не менее заданного.

Этапы реконструкции МТ по линкам в каждом отдельном слое двусторонней эмульсии, а также реконструкция БТ по двум МТ в верхнем и нижнем слое показаны на рисунке 3.9.

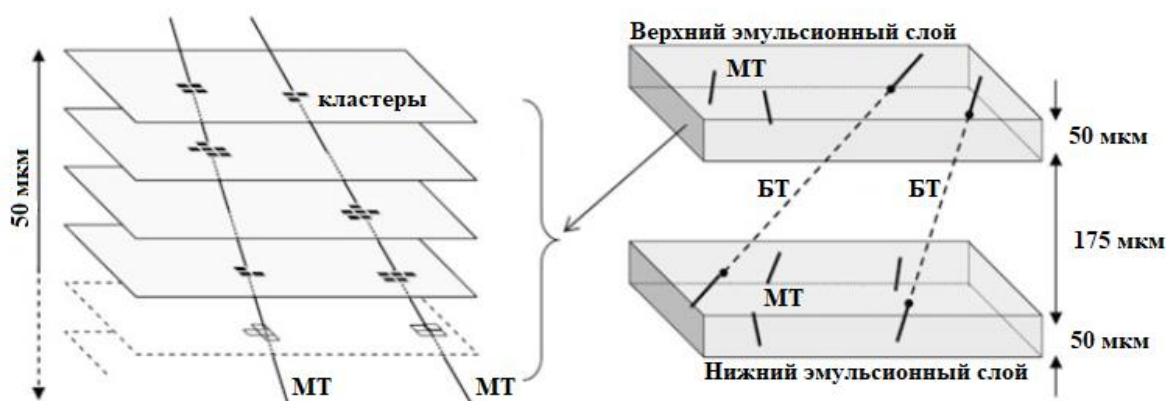


Рисунок 3.9 Этапы реконструкции МТ.

Каждый микротрек является прямой линией, заданной точкой с координатами (x, y, z) и тангенсами (t_x, t_y) углов наклона проекций этой прямой на плоскости XZ и YZ к оси Z , перпендикулярной плоскости эмульсии, см. рис. 3.10.

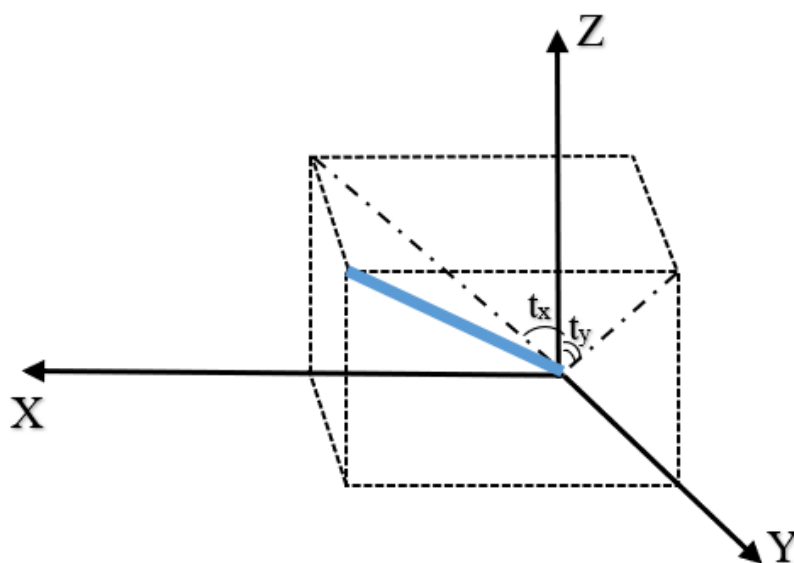


Рисунок 3.10 Микротрек изображен голубой прямой линией, заданной точками с координатами (x, y, z) и тангенсами (t_x, t_y) углов наклона проекций этой прямой на плоскости XZ и YZ к оси Z .

Экспериментальные результаты, представленные на рисунках 3.11 – 3.13 отражают качество производства ядерной фотоэмульсии и этапов онлайн реконструкции треков в процессе сканирования. Профиль количества кластеров от глубины, на которой сделан кадр и их на разброс по полям зрения представлен

на рисунке 3.11 и составляет менее 15 мкм, что не превышает ошибки, заложенной при реконструкции МТ.

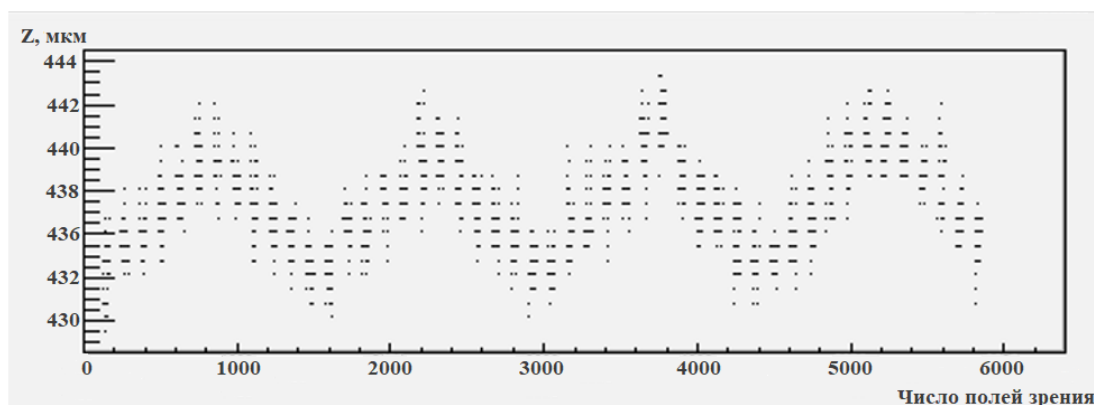


Рисунок 3.11 Профиль количества кластеров от глубины.

Распределения треков, реконструированных в процессе сканирования МТ в плоскости ХУ для верхнего и нижнего эмульсионных слоев СНД??? равномерны, см. рис. 3.12, цветовая шкала отражает количество реконструированных МТ.

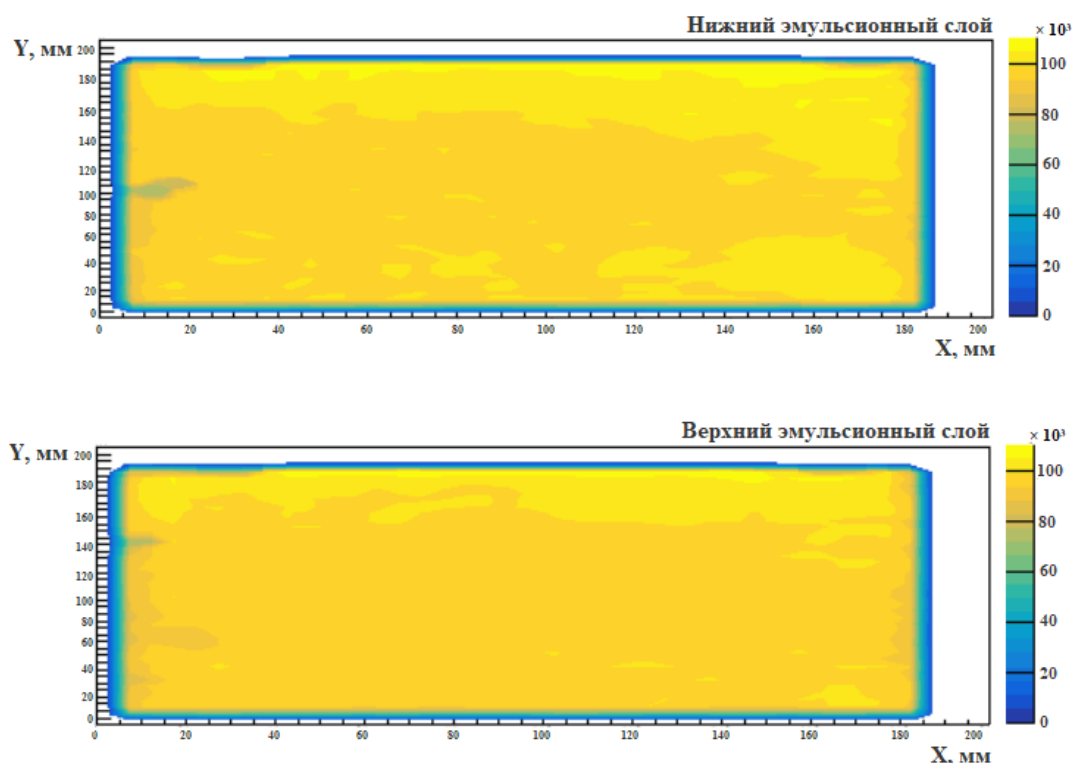


Рисунок 3.12 Распределение МТ в плоскости ХУ для верхней и нижней поверхности двусторонней эмульсии.

Также немаловажной характеристикой является чувствительность фотоэмульсии – число зерен на 100 мкм длины трека заряженной частицы. На рисунке 3.13 показана чувствительность фотоэмульсионного слоя на 100 мкм длины трека - которая составила в среднем более 30 зерен. На рис.3.14 представлена зависимость чувствительности всех реконструированных *ОТ* эмульсионного детектора от азимутального угла θ .

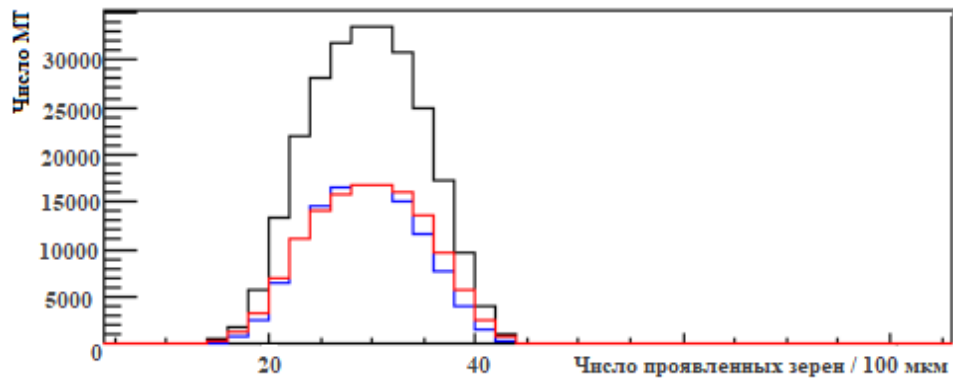


Рисунок 3.13 Чувствительность отдельного эмульсионного слоя: синяя линия – нижний эмульсионный слой, красная линия – верхний эмульсионный слой, черная – их суммарное распределение.

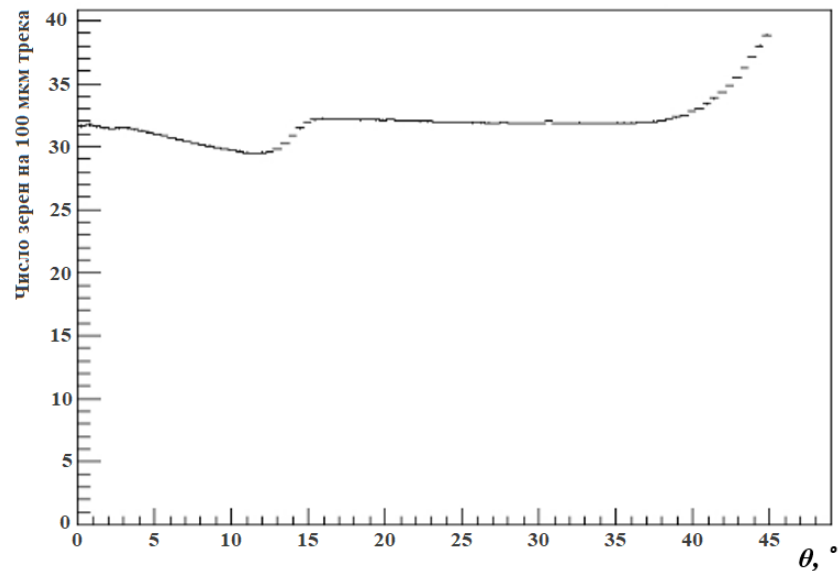


Рисунок 3.14 Зависимость чувствительности *ОТ* фотоэмульсии от угла θ .

Распределения для экспериментальных результатов, представленных на рисунках 3.10 – 3.14, демонстрируют высокое качество произведенной российской эмульсии и возможность оптимизировать экспозицию детекторов [102].

Следующий этап обработки данных – это реконструкция уже в оффлайн режиме так называемых Объемных Треков (ОТ), т. е. треков, проходящих через всю стопку фотоэмульсионных пластин, входящих в состав детектора.

3.2.4 Реконструкция ОТ

Восстановление треков, пересекающих всю стопку эмульсионных пластин, входящих в состав детектора, является важнейшей итоговой операцией реконструкции, при которой происходит переход из локальной системы координат каждой отдельно взятой эмульсионной пластины детектора в единую глобальную систему координат. Эта процедура подразумевает под собой три вида смещений, компенсирующих неточность сборки детекторных слоев относительно друг друга: сдвиг, поворот пластин на некоторый угол друг относительно друга и учет коэффициента усадки эмульсии при проявке, см. рис.3.15.

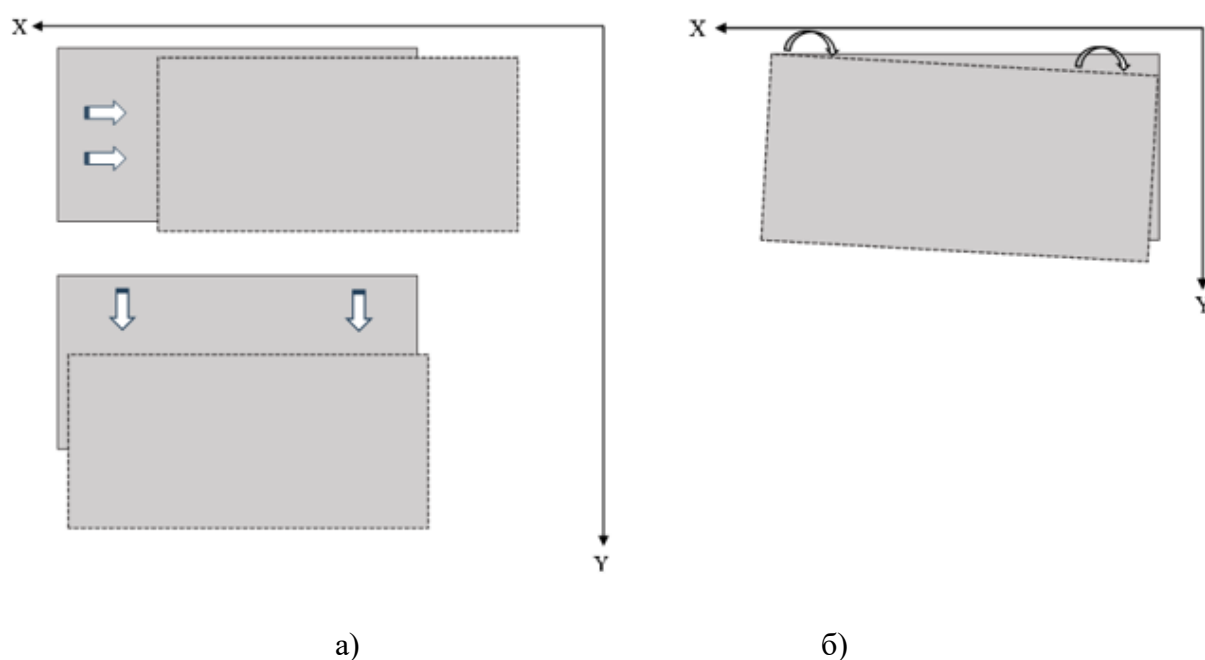


Рисунок 3.15 Схематическое представление операции а) сдвига; б) поворота эмульсии в плоскости XY при переходе в единую глобальную систему координат.

Основываясь на гипотезе, что трек пересекает эмульсионную стопку по прямой линии, можно найти соответствующие коэффициенты, которые позволят осуществить переход от механического позиционирования отдельно взятой пластины в детекторе ($1 \div 5$ мм) к собственной точности эмульсии ($1 \div 3$ мкм).

Процедура поиска трека состоит из нескольких этапов: на первом шаге определяются все пары соседних МТ, из которых формируется БТ, при этом операция оптимизирована по скорости для комбинаторного сокращения соответствующих пар МТ. Из найденных БТ в каждой пластине формируется ОТ, пересекающий всю стопку эмульсий, входящих в состав детектора. На этапе определения параметров для сшивки ОТ берутся треки с площади около 1 см^2 в центре эмульсионной пластины (чтобы избежать механических деформаций, которые могут быть на краю эмульсии), пересекающие всю стопку под небольшими углами (penetrating tracks). Путем итерационных смещений на небольшие расстояния в плоскости ХУ (см. рис. 3.15 а) определяются параметры, при которых число реконструированных ОТ треков максимально. Параметры единой системы координат при таком смещении записываются в файл. Эти параметры положения пластин друг относительно друга берутся как начальные на следующем шаге – поворот эмульсий в плоскости ХУ (см. рис. 3.15 б), где пластины поворачивают на небольшой угол и также определяют параметры, при которых число реконструированных ОТ треков максимально. Параметры единой системы координат также записывают в специальный конфигурационный файл. Затем найденные и записанные в конфигурационный файл параметры используются сначала для реконструкции треков с небольшими углами θ , и, финально - для максимальных θ до 70 градусов (если было сканирование для приходящих под большими углами частиц). На рисунке 3.16 представлен пример реконструкции МТ, БТ, ОТ в детекторе, состоящем из четырех двусторонних эмульсионных пластин.

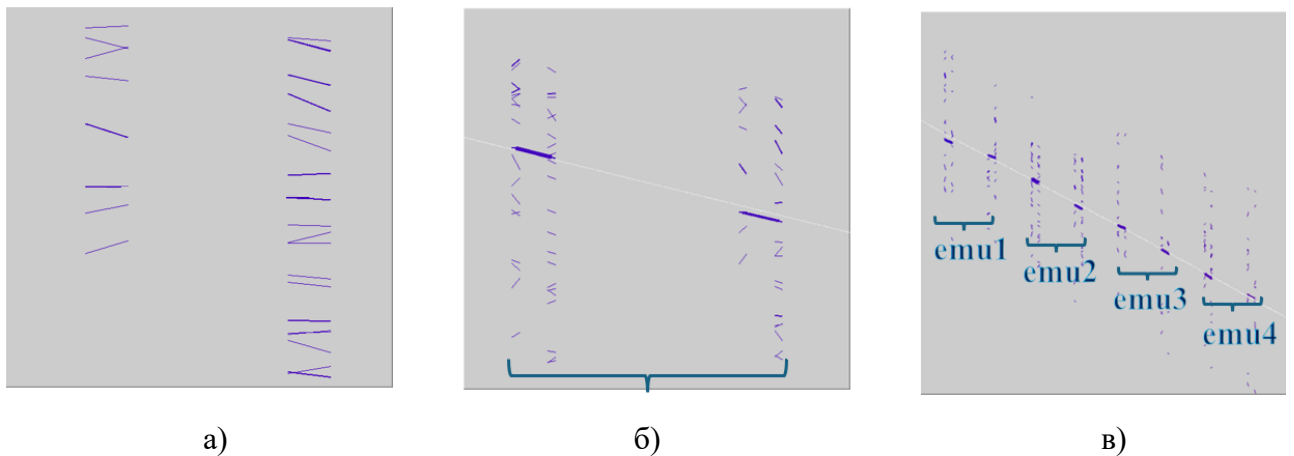


Рисунок 3.16 Реконструкция а) МТ; б) БТ; в) ОТ в единой глобальной системе координат для детектора, состоящего из четырех эмульсионных пластин.

Таким образом, оффлайн процедура реконструкции треков с помощью пакета FEDRA состоит из:

- 1) восстановление БТ из МТ₁ и МТ₂ в рамках каждой пластины (“linking”);
- 2) переход в единую для всех пластин систему координат (“alignment”);
- 3) реконструкция ОТ из нескольких БТ, пересекающих всю стопку эмульсионных пластин, входящих в состав детектора (“tracking”).

Автором работы были написаны скрипты, минимизирующие «человеческий фактор» в данной цепочке реконструкции и автоматизирующие данный процесс (см. приложение). При реконструкции оператор должен ввести идентификационный номер детектора (\$1), число эмульсионных пластин, входящих в его состав (используются два параметра: идентификационный номер первой (\$2) и последней пластины (\$3)). Алгоритм автоматизированной реконструкции треков представлен схематично на рисунке 3.17:

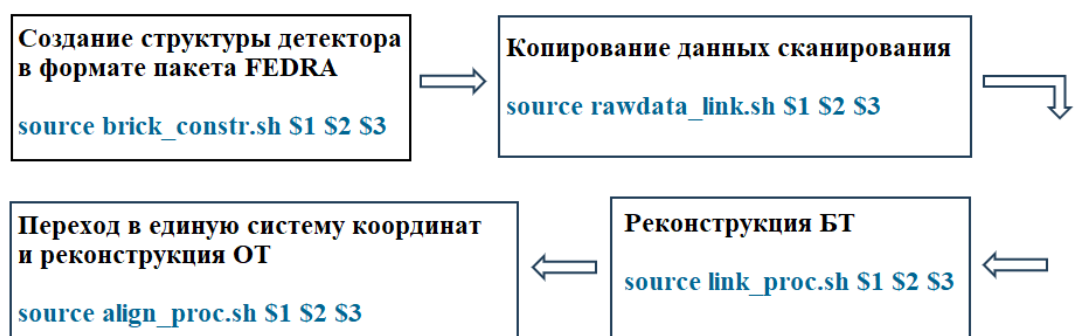


Рисунок 3.17 Блок-схема работы скрипта автоматизированной реконструкции ОТ.

Управляющий скрипт поочередно запускает все отображенные в блок-схеме подпрограммы и, в случае успешного завершения каждой из них, запускает следующую, см. приложение 1.

После реконструкции ОТ проводится физический анализ экспериментальных результатов. Метод мюонографии основан на анализе процессов поглощения потоков мюонов космического происхождения при прохождении через вещество изучаемого объекта. Таким образом, анализируются распределения потока мюонов после прохождения через исследуемый объект в различном диапазоне углов, экспериментальные результаты сравниваются с модельными расчетами, что позволяет выявлять структурные особенности исследуемого объекта с [103,104].

3.2.5 Оценка минимального количества фотоэмульсионных слоев в детекторе.

В данном разделе представлены результаты эксперимента с использованием ядерной фотоэмульсии российского производства для создания методики оптимизации количества эмульсионных слоев для ядерно-физических экспериментов на примере оценки минимального числа эмульсионных пластин при условии сохранения высокой эффективности поиска треков заряженных частиц в эмульсии и точности их реконструкции даже при больших углах прохождения частиц через эмульсию. Эта методика важна для разработки конструкции трековых детекторов в современных ядерно-физических экспериментах, в частности, в работах по мюонографии крупных природных и промышленных объектов, когда для восстановления внутренней структуры объекта используется множество детекторов.

Тестовый эксперимент проводился в Лаборатории элементарных частиц Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). Детектор располагался в комнате на первом этаже главного здания, схема проведения эксперимента и фотография детектора на месте экспозиции представлены на рисунке 3.18.

В детекторе регистрировались потоки атмосферных мюонов, которых приходит примерно 10000 штук на квадратный метр в минуту.



Рисунок 3.18 а) – схема проведения эксперимента (получена GooglePro Earth), б) - фото установки детектора для экспозиции в лаборатории ФИАН.

Детектор состоял из 10 двухсторонних эмульсионных пластин размером $10\text{см} \times 12,5\text{ см}$ (каждая пластина представляла собой пластиковую основу 200 микрон, на которую с двух сторон была полита ядерная фотоэмульсия толщиной 50 микрон). Для идентификации эмульсионных пластин все они были промаркированы в темной комнате, и после этого каждая была упакована под вакуумом в светонепроницаемый пакет. Все эмульсионные слои выравнены относительно горизонтальной оси и прижаты двумя металлическими пластинами, как показано на рисунке 3.19. Во время сборки детектора эмульсионные слои были перемешаны относительно порядка их расположения при хранении для исключения из обработки накопленных до момента экспозиции фоновых треков.

Время экспозиции атмосферными мюонами детектора составило один месяц, по истечении которого детектор был разобран, эмульсионные слои проявлены. После проявки эмульсионные пластины отсканированы с помощью сканирующей станции ПАВИКОМ, позволяющей обрабатывать фотоэмульсионные пленки со скоростью до $190 \text{ см}^2/\text{ч}$ в диапазоне углов до 75° [41]. Область сканирования каждого эмульсионного слоя составила $90 \text{ мм} \times 105 \text{ мм}$, т.к. традиционно был сделан небольшой технический отступ от края пластины. В процессе сканирования в режиме реального времени производится реконструкция так называемых микротреков, МТ – треков, проходящих через один чувствительный слой двусторонней эмульсионной пластины. Дальнейший цикл процедуры реконструкции треков, так называемых объемных треков, ОТ, проходящих через несколько эмульсионных пластин, входящих в состав детектора, выполнялся в offline режиме на UBUNTU Linux сервере при помощи пакета FEDRA [97].

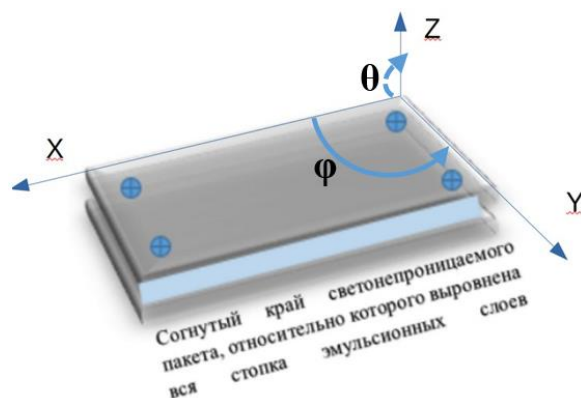
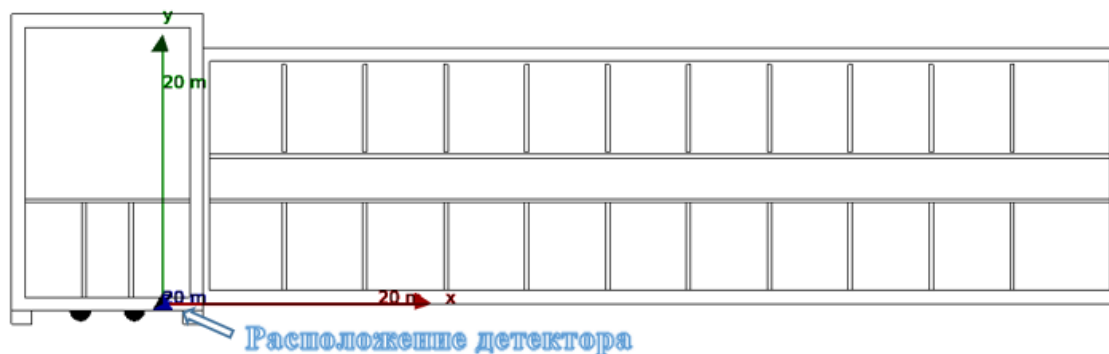


Рисунок 3.19 Схематическое изображение детектора с десятью эмульсионными слоями, зажатými сверху и снизу двумя металлическими пластинами и выравненными вдоль горизонтальной оси X.

Моделирование прохождения мюонов через эмульсионный детектор выполнено с помощью пакета Geant4 [105], который позволяет полностью описать физический эксперимент: геометрию детектора, химический состав образующих его материалов, процессы, происходящие с частицами при прохождении через вещество. Общая информация о геометрии модельного эксперимента представлена на рисунках 3.20, 3.21. Начало системы координат - точка $(x,y,z)=(0,0,0)$, см. рис.3.18 – рис.3.19. Технические характеристики,

заложенные при моделировании помещений ФИАН и «Здания 1» (см. рис. 3.20, рис. 3.21): материал с плотностью 2.650 г/см^3 , внешние стены толщиной 1 м, внутренние — 0,3 м, перекрытия (полы) и крыша — 0,3 м, расстояние от ФИАН до «Здания 1» - 20 м.



а)



б)

Рисунок 3.20 а) - модель крыла здания ФИАН (вид сверху), где расположен детектор, и положение детектора на подоконнике лаборатории, б) - вид с улицы на окно с детектором в лаборатории ФИАН.

При моделировании «Здания 1» заложены шесть перекрытий (полов) на расстоянии три метра друг от друга, внутри пять стен. Для удобства визуального восприятия трехмерная модель «Здания 1» немного повернута вокруг оси Z, в таком положении отчетливо видны перекрытия этажей и внутренние стены помещения, см. рисунок 3.21.

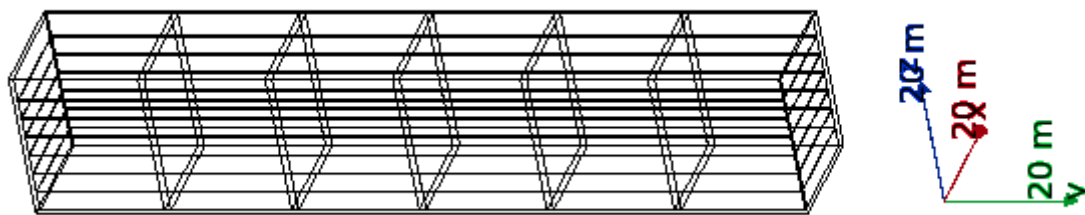


Рисунок 3.21 Трехмерная модель «Здания 1».

Геометрия моделирования помещений ФИАН включала длинный коридор ≈ 20 метров и два ряда кабинетов площадью $6 \times 6 \text{ м}^2$ со стенами между ними и вдоль коридора, полы 2-го и 3-го этажа, крыша и более широкая часть крыла, выступающая на $0,5 \text{ м}$ относительно остальной части крыла, см. фото на рисунке 3.20 б, а также полы 2го и 3го этажа, крыша. Часть здания, где стоит детектор, разделена на три кабинета, промоделированы окна и полуколонны снаружи. Навес крыши над колоннами не заложен в модель, остальная часть здания пустая.

В результате получили набор микротреков: координаты входа и выхода заряженной частицы в слой эмульсии, потери энергии между этими точками, импульс для верхнего и нижнего слоя эмульсии каждой пластины, идентификатор частицы (particle data group code, PDG), номер пластины, номер события и трека. В этом наборе сохраняется информация о прохождении мюонов через заложенные при моделировании трехмерные конструкции помещений.

Энергетический спектр мюонов, падающих на поверхность земли взят из публикации [79], угловой спектр $\sim \cos^2 \theta$. Основной задачей является оценка минимального количества пластин в детекторе, необходимого для реконструкции треков даже под большими углами. Треки были реконструированы в наборах из 4, 6, 8 и 10 идущих подряд пластин, результаты соответствующих двумерных угловых распределений модельных расчетов представлены на рисунке 3.22 а. При анализе данных моделирования в реконструкции участвовали только те треки, которые пересекли весь объём детектора, при анализе экспериментальных данных - три и более эмульсионных

пластин, входящих в состав детектора. Каждый трек характеризуется угловыми переменными θ и φ - зенитным и азимутальным углами, задающими луч в пространстве, где θ - зенитный угол (угол к оси Z, меняется от 0 до 75 градусов, ограничения сканирующей системы), φ - азимутальный угол (отсчитывается от оси X в направлении оси Y и меняется от 0 до 360 градусов), см. рис. 3.19.

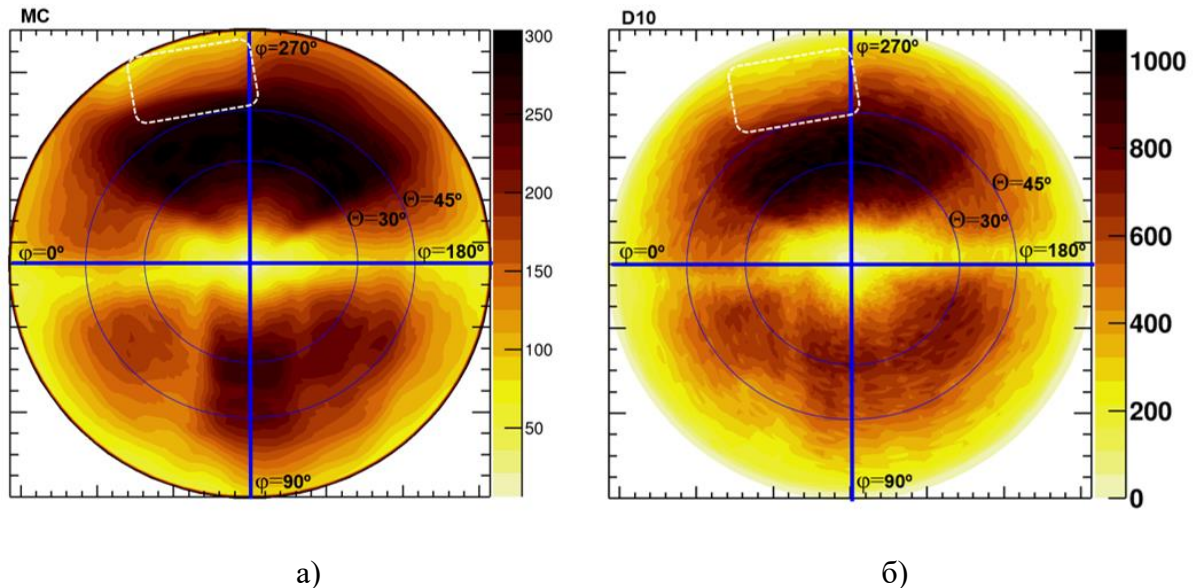


Рисунок 3.22 а) – Угловое распределение треков по результатам модельных расчетов с помощью пакета Geant4, б)- экспериментальные результаты детектора, состоящего из 10-ти фотоэмульсионных пластин.

Большой поток мюонов в верхней полусфере в диапазоне углов $\varphi=(180^{\circ}\div 360^{\circ})$, $\theta=(20^{\circ}\div 45^{\circ})$ в горизонтальном направлении соответствует уличному просвету между «Зданием 1» и помещением ФИАН, где был установлен детектор. Асимметрия (меньший поток) в нижней полусфере данного двумерного распределения интервале углов $\varphi=(10^{\circ}\div 70^{\circ})$ и $\varphi=(70^{\circ}\div 170^{\circ})$ отвечает положению детектора в здании ФИАН, слева от места установки детектора крыло здания ФИАН намного длиннее (см. рис.3.18 фото GooglePro Earth).

Двумерные угловые распределения на основе экспериментальных данных представлены на рис.3.23 и наглядно демонстрируют уменьшение потока мюонов при прохождении через «Здание 1», что соответствует интервалу углов $\varphi=(270^{\circ}\div 310^{\circ})$ и $\theta=(40^{\circ}\div 60^{\circ})$, для удобства отмечено белой пунктирной линией

для вариантов сборки детектора из 10 (рис.3.23а) и 8 (рис. 3.23б) пластин соответственно. Для сборок детектора с меньшим числом пластин: рис. 3.23в, рис. 3.23г – провал в области углов, отвечающих геометрии и местоположению "Здания 1", также присутствует, однако стоит отметить, что при уменьшении числа эмульсионных пластин в детекторе данная область углов становится более размытой по причине уменьшения статистики. Т.е. при работе с большими углами сканирования θ до 75° необходимо большее число пластин.

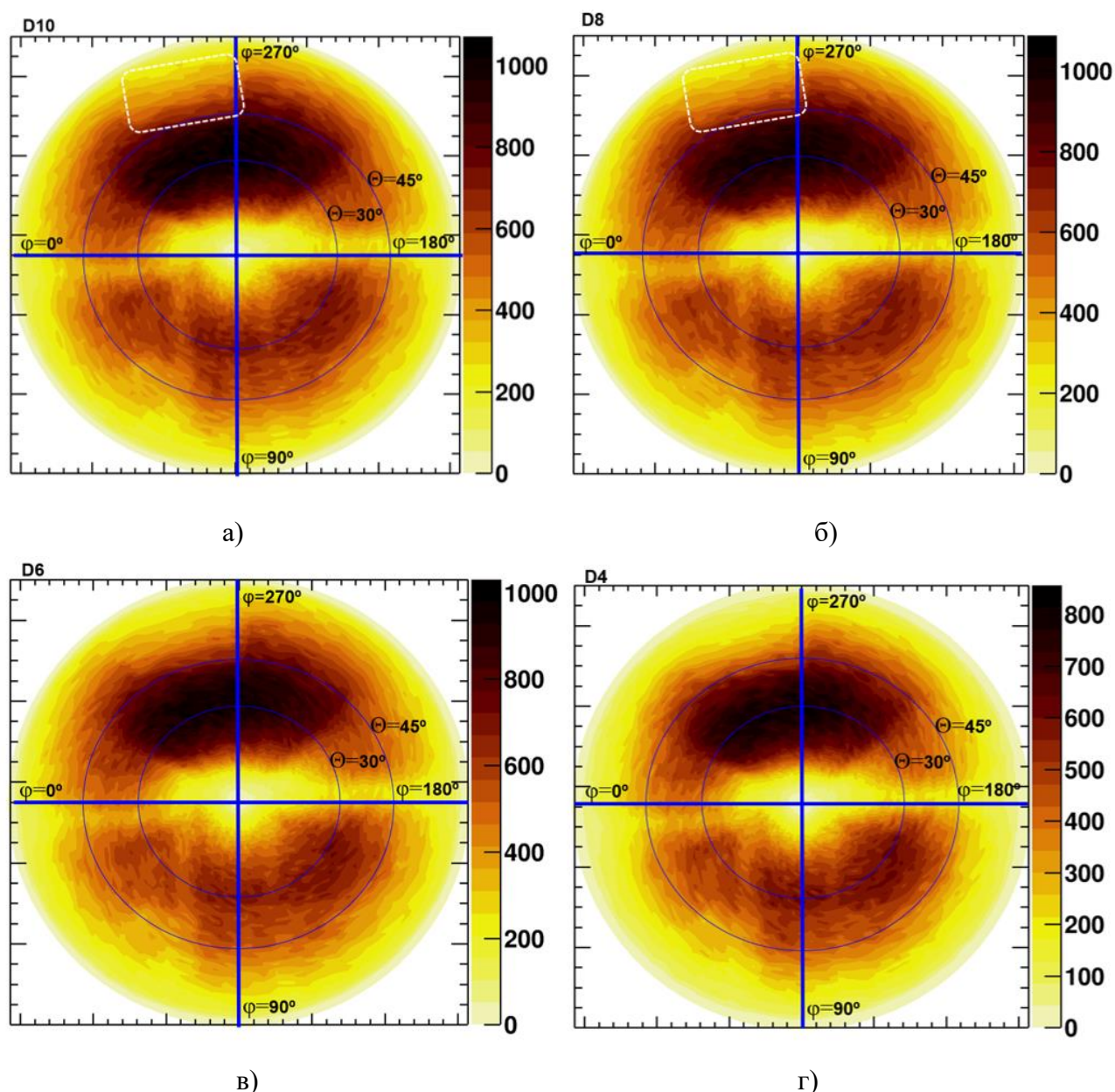


Рисунок 3.23 Экспериментальное угловое распределение треков мюонов, прошедших минимум через три пластины детектора для различных его конфигураций: (а) детектор состоит из 10-ти, (б) 8-ми, (в) 6-ти и (г) 4-х эмульсионных пластин соответственно.

На рисунке 3.24 представлена развертка по углу ϕ для диапазонов угла θ , при котором видна тень от «Здания 1».

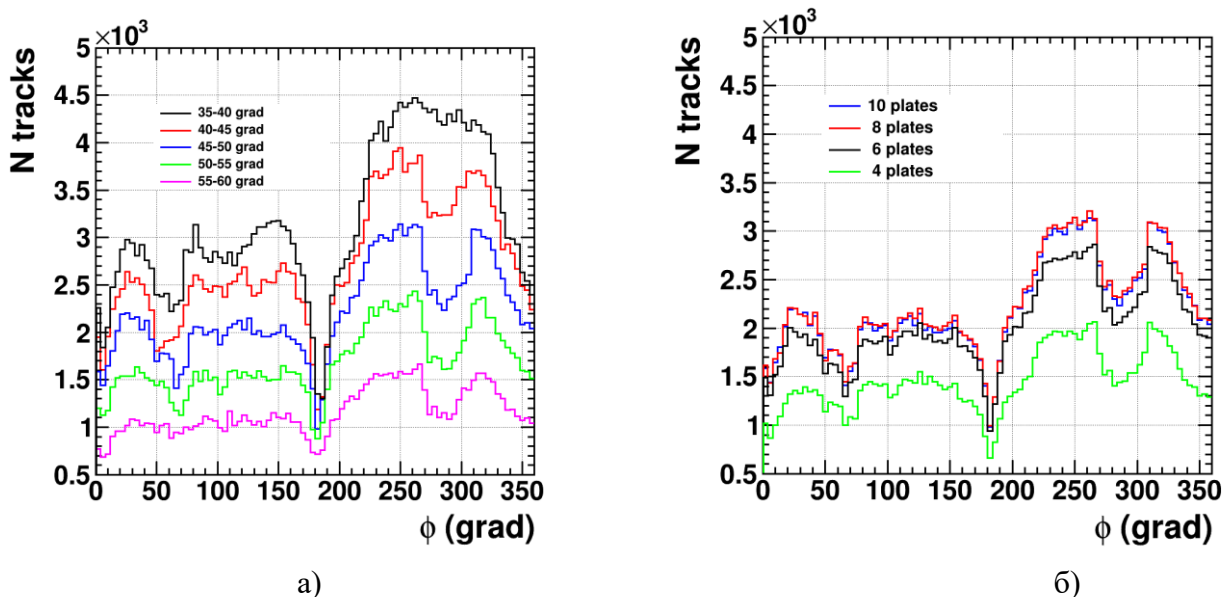


Рисунок 3.24 а) распределения по углу ϕ для различных диапазонов угла θ , б) распределения по углу ϕ при $\theta=45^\circ\div 50^\circ$ для различного числа пластин, входящих в состав детектора.

Слева направо на рисунке 3.24 первый провал: $\phi=(60^\circ\div 70^\circ)$ в распределении по ϕ соответствует внутренней вертикальной стене помещения ФИАН (см. фото на рис.3.20 б); второй провал: $\phi=180^\circ$ соответствует внешней горизонтальной стене ФИАН; провал от «Здания 1»: $\phi=(270^\circ\div 300^\circ)$. Данные, представленные на рисунке 3.24, наглядно демонстрируют, что при высокой эффективности реконструкции трека, в случае данного эксперимента - большей 80%, провал от «Здания 1» присутствует даже при небольшом числе пластин, однако интенсивность зарегистрированных треков падает, что может быть критичным для регистрации объектов меньших размеров.

Экспериментальные результаты (см. рис. 3.23, 3.24), продемонстрированные в эксперименте по оптимизации количества эмульсионных слоев, необходимых для исследования внутренней структуры крупных объектов методом мюнографии показали, что для исследования объектов с использованием преимущественно околоразногизонтальных потоков

мюонов $45^0 < \theta < 75^0$, необходимо минимум шесть фотоэмульсионных пластин, в то время как для объектов «просвечиваемых» мюонами с углами падения $\theta < 45^0$ - достаточно четырех эмульсионных пластин [79].

Таким образом, метод мюонографии на основе эмульсионных трековых детекторов дает возможность получения подробной томограммы исследуемого объекта с использованием новейших методов анализа изображений. Уникальность и преимущества методики состоят в том, что она осуществляет диагностику самых разнообразных природных и промышленных объектов с использованием экономичных и компактных детекторов достаточно простой конструкции, находя свое применение во многих прикладных исследованиях во всем мире, в частности, как перспективное дополнение к геофизическим и геологическим методам при анализе вулканических, сейсмических и карстовых процессов, в разведке полезных ископаемых, в области ядерной безопасности для радиационного мониторинга установок ядерно-энергетического комплекса, для осуществления мониторинга опасных промышленных объектов, при неинвазивном исследовании объектов культурного наследия.

Глава 4. Мюонографические исследования крупных природных и промышленных объектов

4.1 Апробация метода - тестовые эксперименты

В мировой практике мюонографических исследований сначала использовалась в основном электронная аппаратура [106–108] громоздкая и сложная в эксплуатации, что привело к практическому закрытию на многие годы этой методики исследований. Новая эра в развитии мюонографии связана со значительным прогрессом в технологии ядерной фотоэмульсии: наличием двух производителей качественной ядерной фотоэмульсии в России и Японии, и с преодолением основного недостатка эмульсионной методики – трудоемкости обработки - благодаря созданию инновационных высокотехнологичных комплексов для сканирования данных ядерных фотоэмульсий, которые позволили реализовать высокоскоростную автоматизированную обработку этих трековых детекторов, сохраняющих до сих пор самое высокое пространственное разрешение [88,109,110]. К основным преимуществам эмульсионных трековых детекторов, помимо небольших размеров и простоты конструкции, относятся, прежде всего, высокое пространственное (<1 мкм) и угловое (~ 1 мср) разрешение, кроме того, большая информационная емкость, удобство транспортировки и простота эксплуатации в сложных условиях. Важнейшими преимуществами ядерных эмульсий являются их независимость от источников энергоснабжения и отсутствие необходимости электронной считывающей системы в процессе экспозиции.

ФИАН, НИТУ МИСИС, НИЯУ МИФИ и НИИЯФ МГУ активно и успешно развивают в России мюонографию с использованием эмульсионных детекторов для исследования внутренней структуры крупных природных и промышленных объектов.

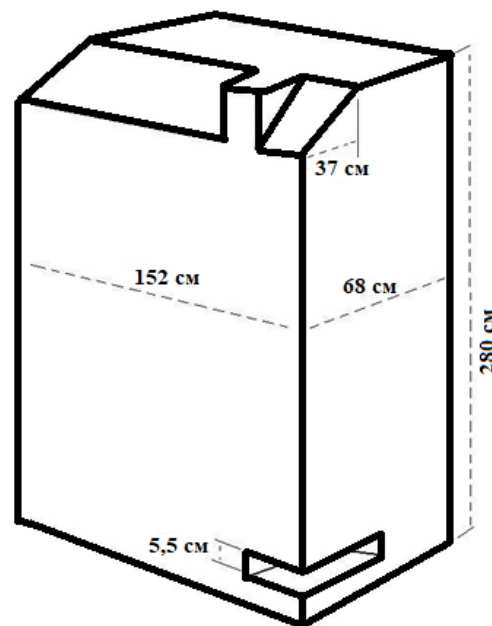
На начальном этапе прежде всего были выполнены два тестовых эксперимента – на стальной колонне ярма магнита циклотрона НИИЯФ МГУ и на двух инерционных барабанах шинного стенда НИИ авиационной промышленности. В результате тестовых экспериментов были выработаны

методические подходы для конструирования детекторов и определения оптимальных условий экспозиции.

Объектом первого тестового мюнографического эксперимента стала стальная колонна весом 23 тонны (ярмо магнита циклотрона НИИЯФ МГУ), которая играла роль массивного поглотителя мюонов космических лучей и создавала "тень" в потоке этих частиц, см. рисунок 4.1.



а)

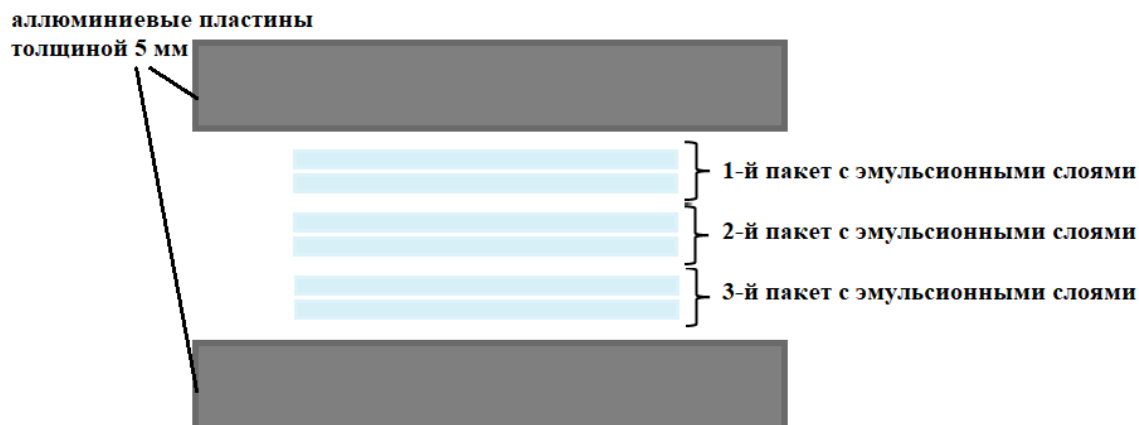


б)

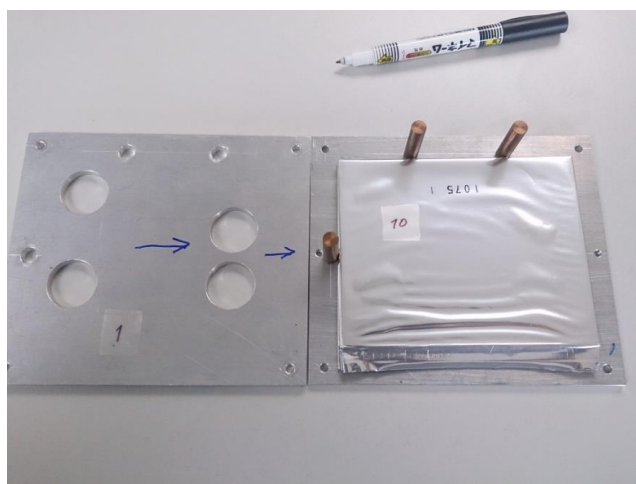
Рисунок 4.1 а) Фотография установленных эмульсионных детекторов внутри и вне стальной колонны; б) схематическое изображение стальной колонны, в теле которой размещались эмульсионные детекторы.

В эксперименте были использованы ядерные эмульсии производства российской компании ООО “СЛАВИЧ” и дублирующие - производства японской компании Fuji Photo Film, применяемые в международном эксперименте OPERA [11]. Таким образом осуществлялось, в том числе, тестирование качества российской эмульсии. Детекторы, подготовленные для испытаний, представляли собой плотно упакованные стопки из 6-ти эмульсионных пластин, каждая площадью $10 \times 12.5 \text{ см}^2$, упакованных по два эмульсионных слоя в светонепроницаемые пакеты и жестко закрепленных в каркасах из алюминиевых пластин. Металлические шпильки фиксировали положение каждого эмульсионного пакета внутри детектора. Внешний вид

готового детектора, а также схематичное расположение слоев внутри детектора показаны на рисунке 4.2.



а)



б)

Рисунок 4.2 а) схема расположения слоев эмульсии между металлическими пластинами, б) внешний вид эмульсионного детектора; справа – на металлической пластине лежат шесть слоев эмульсии, упакованных в светонепроницаемые пакеты; слева – верхняя металлическая пластина для фиксации эмульсий.

На рисунке 4.3 представлен чертеж детектора, впервые использованного в тестовом эксперименте на циклотроне МГУ. Впоследствии эта конструкция детектора была неоднократно использована для отработки различных методических подходов в мюонографии.

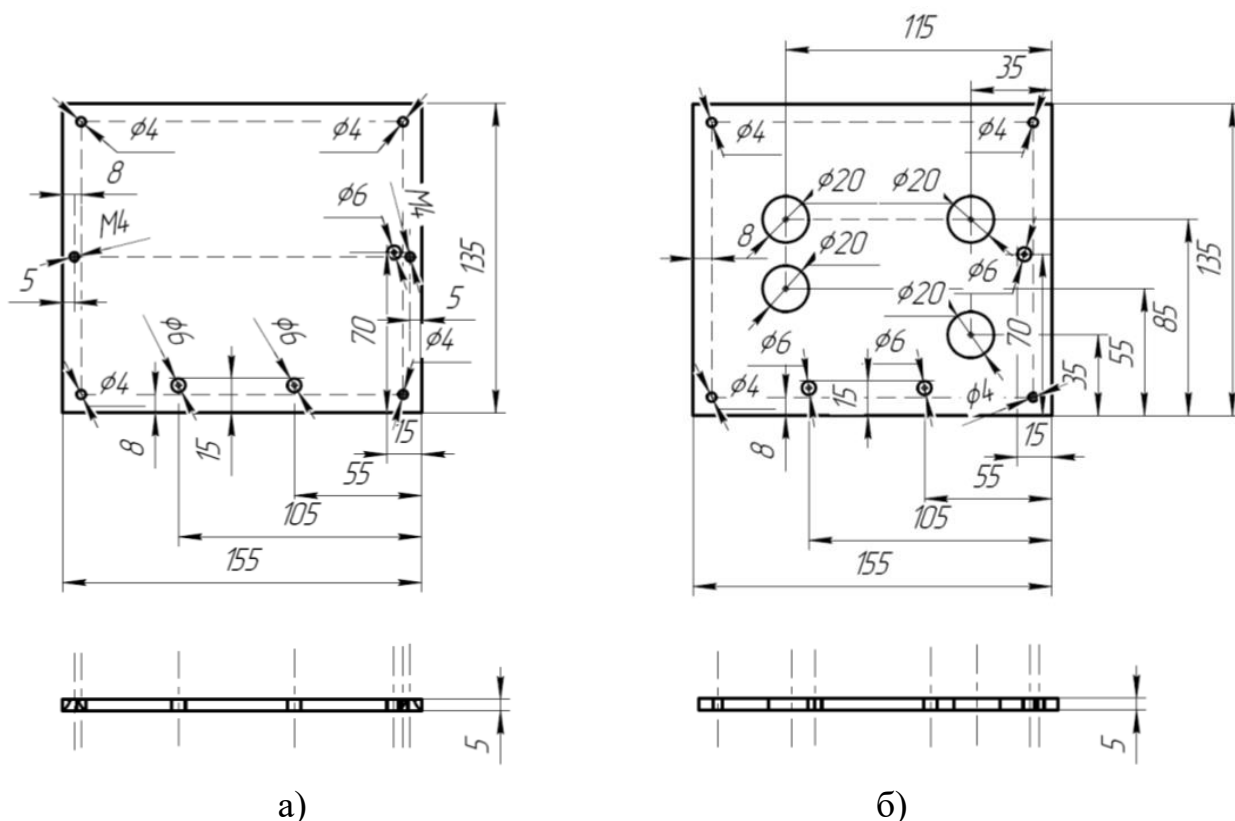


Рисунок 4.3 Сборочный чертеж для а) рамы детектора, б) крышки детектора. Детектор включает в себя следующие комплектующие: алюминиевая рама, размер: 155x135 мм – 1 шт.; крышка детектора, размер: 155x135 мм – 1 шт.; шпильки, диаметр: 6 мм, – 6 шт.; пористая листовая резина на основе вспененного EPDM каучука EPDM 150, толщина 4-5 мм, размер: 125x105 мм – 1 шт.

Время экспозиции детекторов составило 49 дней. Проявка эмульсионных слоев произведена ООО “СЛАВИЧ”. Перекрестное сканирование эмульсий выполнено на автоматизированных комплексах ПАВИКОМ (ФИАН) и ВИСKAN-500 (НИИЯФ МГУ).

Результатом сканирования каждой эмульсионной пластины является массив данных, который задает с высокой точностью положение в пространстве треков всех зарегистрированных мюонов, включая их зенитные и азимутальные углы падения. На рисунке 4.4 представлены угловые распределения потока мюонов, приходящих на детектор в выделенном диапазоне углов, в зависимости от длины пути в железном поглотителе (колонне). Были также проведены модельные расчеты ослабления потока мюонов при прохождении его через исследуемый объект (см. рис. 4.1 б) с плотностью $\rho = 7,874 \text{ г/см}^3$ (плотность железа). Построение модельных зависимостей ослабления потоков мюонов в колонне

было выполнено с использованием программного пакета GEANT4. При моделировании использовались основные механизмы потерь энергии мюона при прохождении слоя железа: ионизация (включая образование δ -электронов), образование электрон-позитронных пар, тормозное излучение и неупругое взаимодействие мюонов с ядрами. Результаты расчетов угловых распределений потоков мюонов при прохождении через стальную колонну приведены на рисунке 4.4 в виде сплошной кривой.

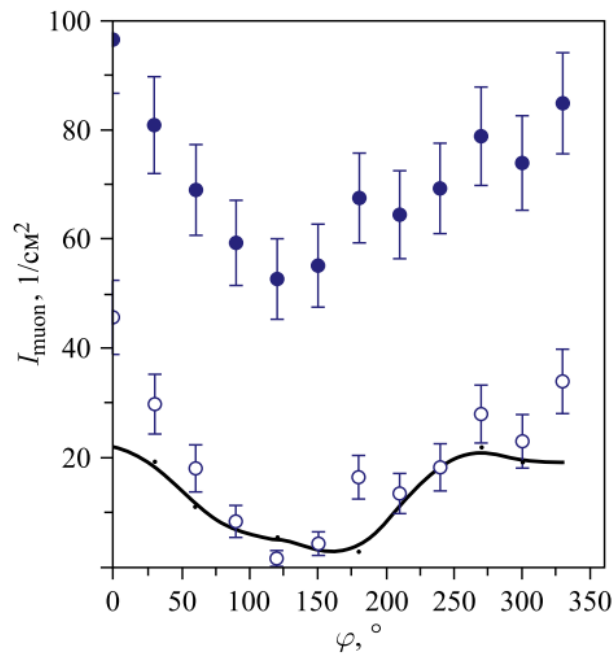


Рисунок 4.4 Угловые распределения потоков мюонов при разных азимутальных углах φ и фиксированном диапазоне зенитных углов θ , полученные в результате первого тестового эксперимента, в сравнении с результатами модельных расчетов: сплошная кривая – расчет, заштрихованные кружки – результат эксперимента без вычета фона, незаштрихованные кружки – результат эксперимента с вычетом фона.

Дополнительно была проведена оценка влияния фоновых событий, которые могут быть зарегистрированы за интервалы времени, соответствующие реальному времени подготовительных работ с эмульсией до экспозиции и после экспозиции до проявления, которые показали, что при величине интервала $\Delta t > 0,5$ суток влияние фона весьма существенно, а значит время подготовки эксперимента не должно превышать этого значения, см. таблица 1.

Δt , сутки	0,5	10	49	100
$I_{фон}$ (мюон/см ²)	0,4	8	42	90

Таблица 4.1 Оценки значений интенсивности фона $I_{фон}$ (мюон/см²) за время Δt (до и после экспозиции).

Детектор, установленный вне массивной колонны, был использован для оценки полного потока мюонов на уровне колонны. Экспериментально полученные угловые распределения, представленные на рисунке 4.4, наглядно демонстрируют ослабление потока мюонов, обусловленное их поглощением при прохождении через массивное тело колонны и находятся в полном соответствии с предсказаниями модельных расчетов. Сравнение данных, полученных с помощью японской и российской эмульсий, продемонстрировало качество российской эмульсии, соответствующее мировым стандартам.

Второй тестовый эксперимент был проведен на территории НИИ шинной промышленности, г. Москва [6]. Объектом наблюдения были диски бегового барабана - инерционного элемента испытательного стенда общим весом 40 тонн и диаметром ≈ 3 метра каждый, см. рисунок 4.5.

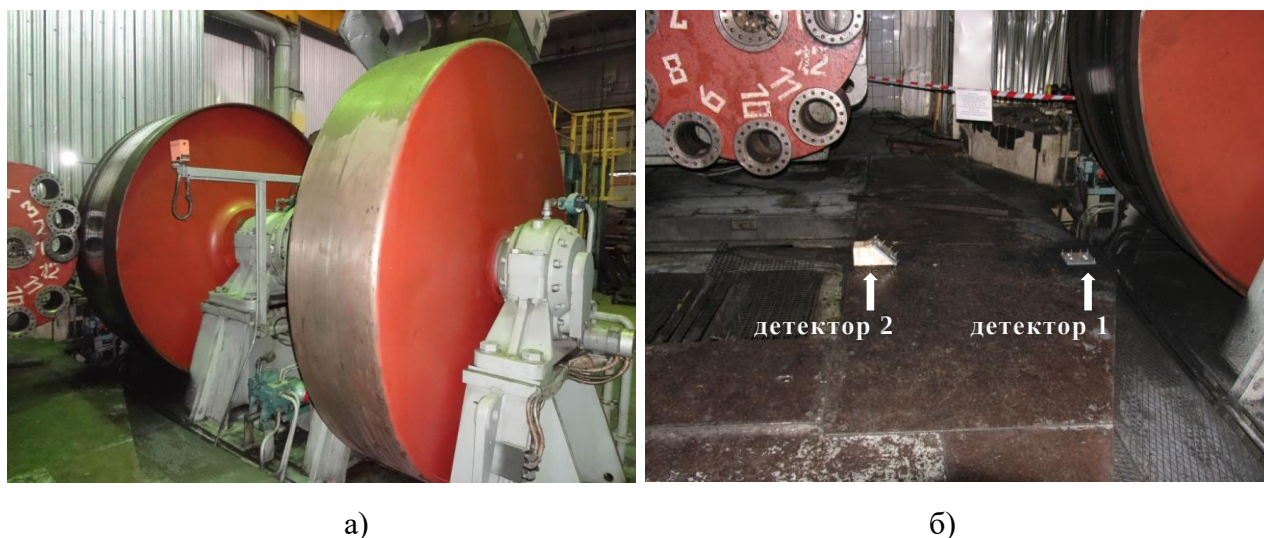


Рисунок 4.5 а) Фото испытательного стенда, диаметр дисков бегового барабана 3 м каждый, б) -расположение детекторов на испытательном стенде.

Конструкция и схема сборки эмульсионных детекторов аналогична первому тестовому эксперименту.

Для представления результатов второго тестового эксперимента использовались переменные tx и ty - тангенсы углов наклона треков в проекциях на плоскости xz, yz , где $tx = \frac{dx}{dz} = tg\theta \cdot \cos\varphi$, $ty = \frac{dy}{dz} = tg\theta \cdot \sin\varphi$ в координатах детектора. Для удобства восприятия на плоскость $tx:ty$ рисунка 4.6 наложена также координатная сетка (θ, φ) , (θ —круги, φ - лучи, выходящие из начала координат) в соответствии с соотношениями $tg(\varphi) = \frac{ty}{tx}$ и $tg^2\theta = tx^2 + ty^2$.

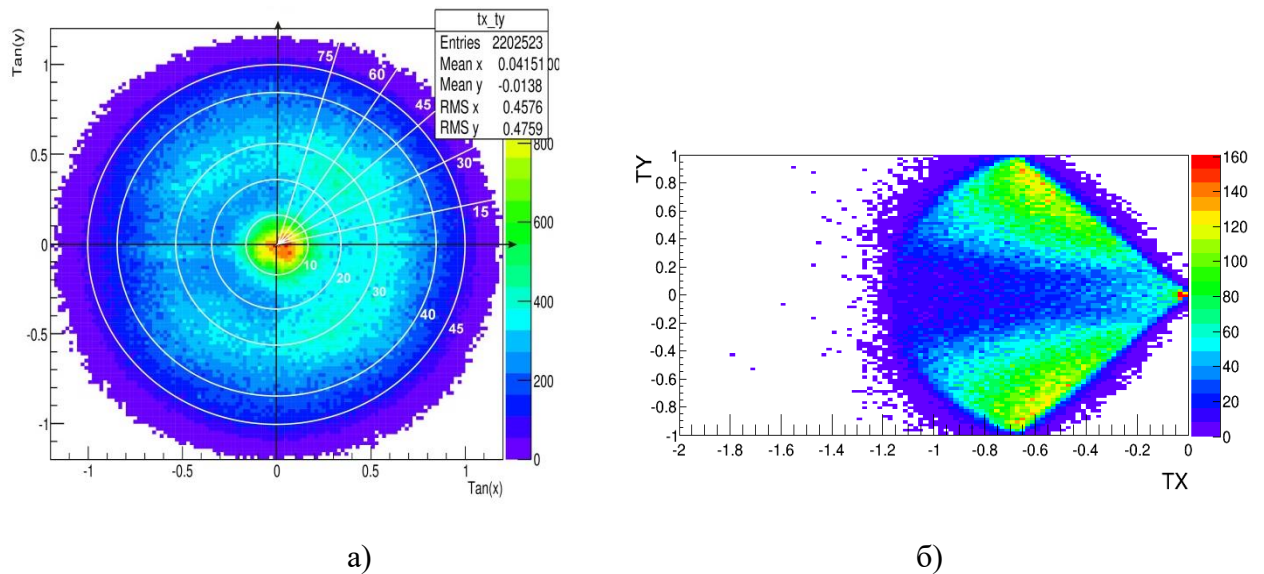


Рисунок 4.6 Угловые распределения мюонов после прохождения дисков беговых барабанов испытательного стенда: а) - экспериментальные распределения, полученные в ядерной эмульсии детектора 1; б) - результаты модельных расчетов, цветовая шкала отражает поток мюонов в заданном диапазоне углов.

Модельные расчеты выполнены с помощью пакета Geant4 [111] с учетом формы и материала исследуемого объекта. Приведенное на рисунке 4.6 двумерное угловое распределение для детектора 1 наглядно демонстрирует “тень” от бегового барабана испытательного стенда (рис. 4.6 а) и находится в хорошем соответствии с модельными расчетами (рис. 4.6 б).

В этих выполненных первых тестовых экспериментах были осуществлены: разработка методических подходов и прототипов технических решений по реализации метода мюонографии в условиях реального эксперимента; проведены модельные расчеты в приложении к конкретным выбранным объектам исследований с учетом реальных условий эксперимента; адаптирована программная реализация расчетных алгоритмов пакета FEDRA по

восстановлению треков на имеющемся ПО сканирующего комплекса ПАВИКОМ.

Анализ результатов, полученных в тестовых экспериментах с использованием метода мюонографии, показывает, что, в соответствии с предсказаниями модельных расчетов, эмульсионная трековая методика позволяет получить надежные данные об особенностях структуры исследуемых объектов. Пространственные распределения потоков мюонов, измеренные в тестовых экспериментах, и расчетный прогноз неоднородностей в структуре объектов дают хорошее согласие [85].

4.2 Мюонография шахты Геофизической службы РАН

Первый в России полномасштабный мюонографический эксперимент с использованием эмульсионных детекторов был успешно выполнен в шахте Геофизической службы РАН (г. Обнинск). В ходе измерений с использованием трековых эмульсионных детекторов предполагалось зарегистрировать разницу потоков атмосферных мюонов на поверхности земли и на глубине 30 метров. В число задач эксперимента входила также оценка возможности "обнаружения" лифтовой полости.

Сооружение Геофизической службы РАН представляет собой железобетонную конструкцию, расположенную на глубине 30 м внутри слоя мраморовидного известняка и монолитно связанную с коренной породой. В здании имеются изолированные комнаты, в которых поддерживается естественная устойчивая температура около $+8^{\circ}\text{C}$ с сезонными вариациями около $+1^{\circ}\text{C}$. Детекторы с фотоэмульсионными слоями были установлены в шахте на глубине 30 м в ближайшей к лифту комнате, см. рисунок 4.7.

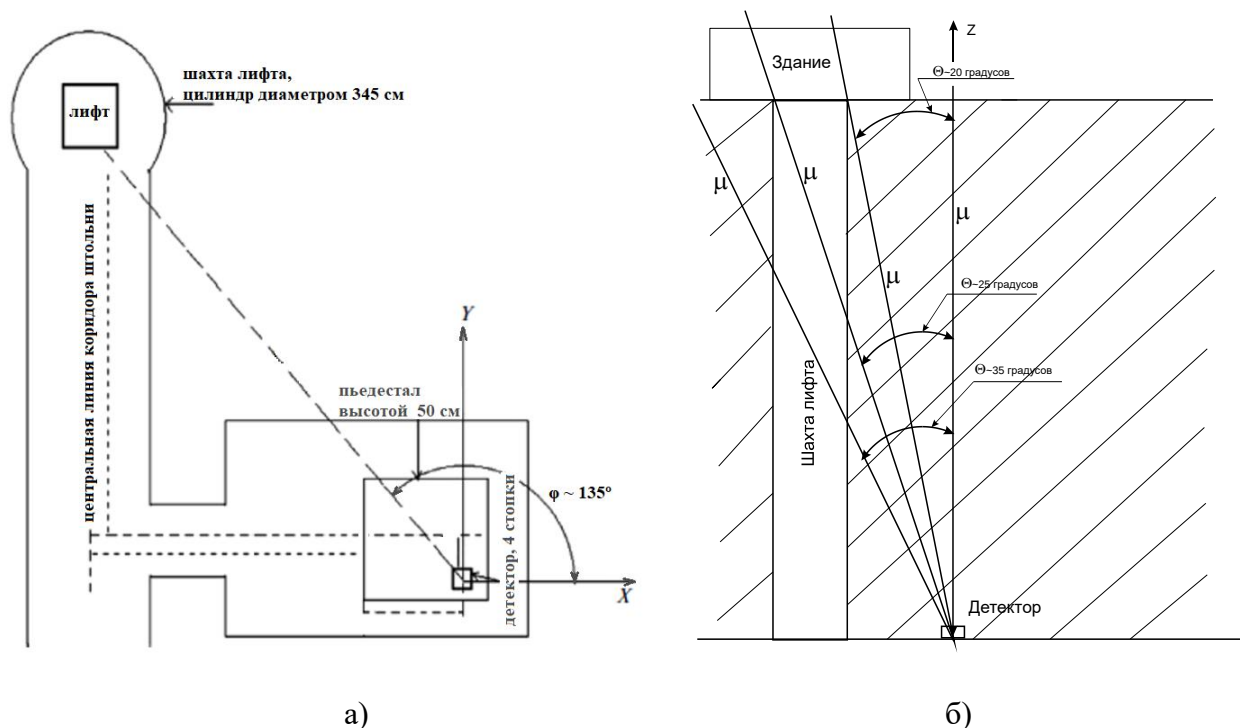


Рисунок 4.7 Схема эксперимента в шахте на глубине 30 м: а) - относительное расположение шахты лифта и подземных детекторов (вид сверху), показана ориентация осей x и y в системе детектора; б) - относительное расположение детектора и шахты лифта (вид сбоку), диапазон угла θ (20-35°), в котором должен наблюдаться “сигнал” от шахты.

На рисунке 4.7 а) показана ориентация осей x и y в системе детектора, на рисунке 4.7 б) отмечен диапазон углов, в котором должен наблюдаться “сигнал” от шахты, а также несколько траекторий мюонов, проходящих под разными углами θ . При $\theta \sim 25^\circ$ и $\varphi \sim 135^\circ$, т. е. в направлении шахты лифта поглощение мюонов ослаблено наличием полости, и, следовательно, поток мюонов с этого направления должен превосходить фон.

В эксперименте были использованы ядерные эмульсии производства российской компании производства российской компании ООО “СЛАВИЧ” и производства японской компании Fuji Photo Film (эксперимент OPERA). Детекторы, подготовленные для испытаний, представляли собой плотно упакованные стопки из десяти политых с двух сторон эмульсионных пластин площадью $10 \times 12,5 \text{ см}^2$, жестко закрепленных в каркасах из алюминиевых пластин (использовалась конструкция, проверенная при работе на циклотроне МГУ). Внешний вид четырех детекторов на местах облучения под землей приведён на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 Фото четырех детекторов, установленных под землей на глубине 30 метров.

Четыре «подземных» детектора использовались для определения оптимального времени экспозиции (2 или 4 месяца), достаточного для получения необходимой информации. Проявка эмульсионных слоев произведена ООО «СЛАВИЧ». Эмульсии отсканированы на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ с восстановлением МТ в online режиме; дальнейшая реконструкция треков, пересекающих каждую фотоэмульсию в отдельности (БТ), а также треков, пересекающих всю стопку эмульсий, входящих в состав детектора, произведена уже в режиме offline при помощи пакета FEDRA (процедура “alignment” и “tracking”, см. ГЛАВА III настоящей диссертации). Схематически иллюстрация обозначений МТ, БТ, ОТ представлена на рисунке 4.9.

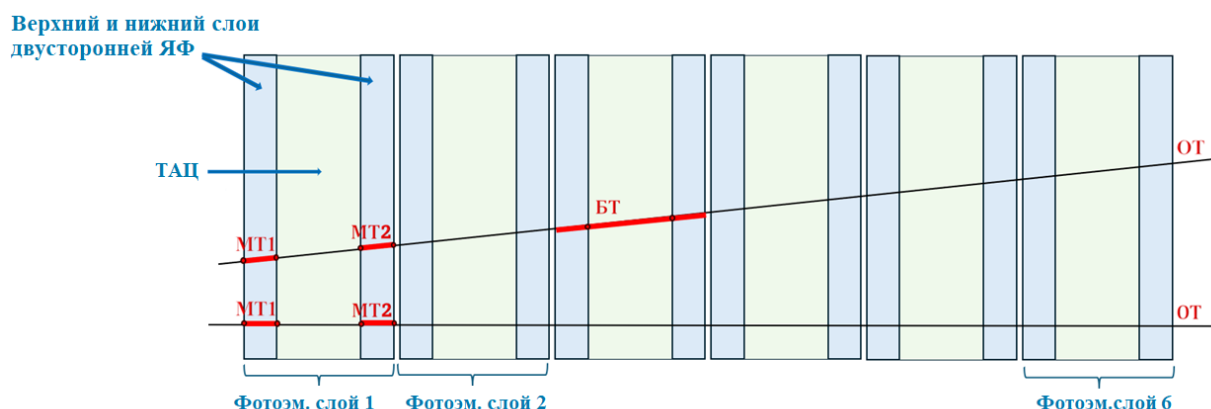


Рисунок 4.9 Схематическое представление МТ, БТ, ОТ.

При продлении каждого БТ в соседний слой фотоэмульсии восстанавливаются ОТ, пересекающие всю стопку эмульсий, входящих в состав детектора. Однако стоит отметить, что возникает некий комбинаторный фон

треков для двух близлежащих друг к другу пластин и количество реконструированных ОТ, пересекающих две соседние эмульсионные пластины, более чем на порядок превышает число ОТ, пересекающих скажем 4 пластины из 10, (см. рис. 4.10 а).

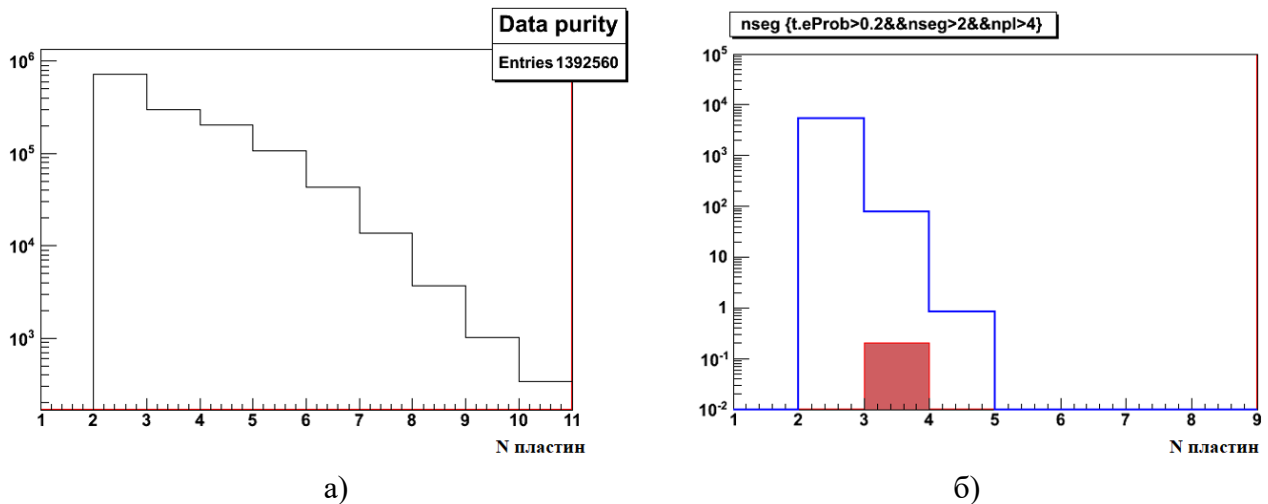


Рисунок 4.10 Число реконструированных ОТ: а) – реальные экспериментальные данные, б) – случайно восстановленные ОТ при больших сдвигах и поворотах пластин друг относительно друга в процессе реконструкции (красный квадрат – вероятность зарегистрировать ложно реконструированный трек, который пересек более 4-х пластин).

Рисунок 4.10 демонстрирует как реально восстановленные данные в зависимости от числа пластин, которые пересек ОТ, см. рис. 4.10 а, так и ложно реконструируемые ОТ, которые получаются при таких смещениях и поворотах пластин друг относительно друга, что реальный трек, не будет находиться в данном наборе реконструированных ОТ, см. рис. 4.10 б. После таких сдвигов и поворотов плоскостей эмульсии, все еще можно реконструировать некоторые объемные треки, состоящие из 2÷3 БТ, однако, их количество намного меньше реальных ОТ. Для минимизации комбинаторного фона при реконструкции ОТ, использовались только те, которые состояли из трех и более БТ ($N_{\text{БТ}} \geq 3$), и пересекали не менее четырех пластин ($N_{\text{пл}} \geq 4$), при этом число пропусков при реконструкции ОТ должно быть не больше трех при данной конструкции детектора (общее число пластин равно 10). Вероятность реконструкции ложного ОТ при таких ограничениях, см. распределение см. рис. 4.10 б (красный квадрат), крайне мала.

При планировании эксперимента были сделаны оценки потоков мюонов в месте расположения детектора с разных направлений. При выполнении расчётов принята модель, в соответствии с которой пространство в шахте рассматривалось, как пустота, и других поглотителей вокруг шахты, кроме грунта, не было. Для вычислений из работы [79] была взята вертикальная составляющая потока космических мюонов, которая была дополнена зависимостью от угла θ в виде $F(\theta) \sim \cos(\theta)^2$. На рисунке 4.11 представлены модельные расчеты в виде трёхмерного распределения потоков мюонов как функция углов θ и φ в области присутствия шахты, поскольку другие области углов не представляют интереса. Ось X в расчётах была направлена на ось шахты лифта.

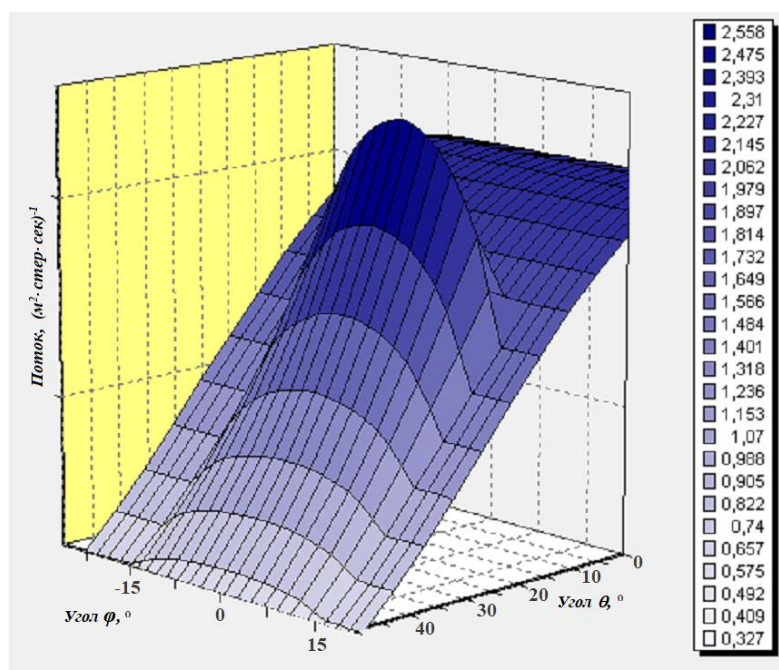


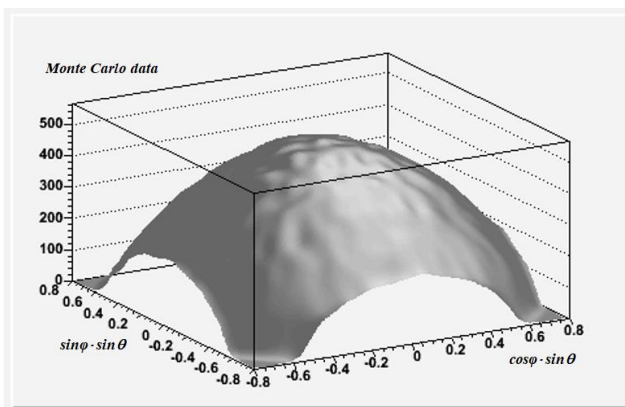
Рисунок 4.11 Трёхмерное изображение угловой зависимости потоков мюонов в точке расположения детекторов под землёй.

Из данных модельных расчетов, представленных на рисунке 4.11 видно, что "сигнал" от шахты проявляет себя достаточно чётко. Полученный при расчёте результат представляет собой верхний предел потоков, поскольку в него вошли мюоны, имеющие малые импульсы (начиная с почти нулевых) и не регистрируемые детектором. Кроме того, при расчете не учитывались другие

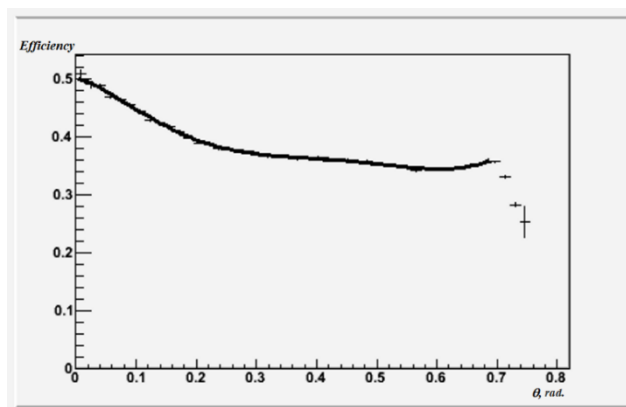
поглотители (элементы здания и механизма подъёма лифта), особенно сильно проявляющие себя в верхней части шахты.

Чтобы получить приближенный к реалистичному спектр, треки мюонов, сгенерированных на поверхности, были продлены в слое грунта ($\rho=1,5 \div 3,3$ г/см) на глубину 30 м с помощью пакета GEANT4. Полученное угловое распределение моделируемых мюонов показано на рис. 4.12 а. Параметризация спектра мюонов взята из [112]. Так как в данной экспозиции была частично использована эмульсия, произведенная для эксперимента OPERA, то необходимо было учесть невысокую эффективность реконструкции треков ввиду эффекта “старения” фотоэмульсионных слоев [40]. Обычно эффективность реконструкции треков составляет $(80 \div 90)\%$, в данном случае, она не превышала $(40 \div 50)\%$, см. рис. 4.12 б.

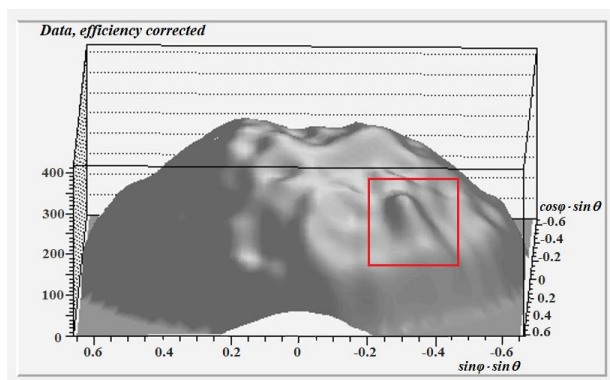
Полученные экспериментальные распределения мюонов, прошедших через эмульсионный детектор, экспонировавшийся на глубине 30 м в течение 4 месяцев, с поправкой на эффективность реконструкции треков приведены на рисунке 4.12 в), и, наконец, на рисунке 4.12 г) введены поправки и на низкую эффективность и на фоновое распределение потока мюонов на данной глубине. На обоих экспериментальных распределениях рис. 4.12 в), и рис. 4.12 г) отчетливо виден пик, соответствующий положению шахты лифта (область выделена красным квадратом).



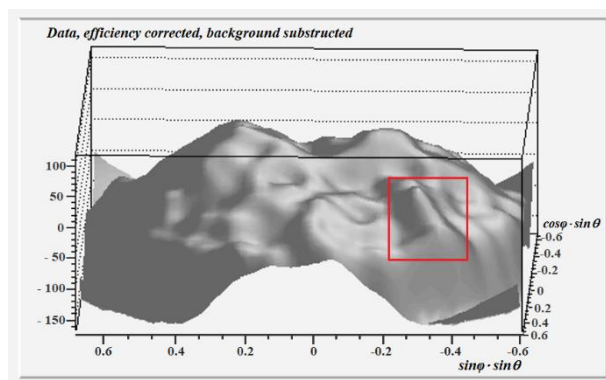
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.12 Распределение потока мюонов в шахте Геофизической службы РАН
а) - усреднённое по азимутальному углу φ фоновое, сгенерированное в пакете GEANT4,
б) - эффективность реконструкции трека в зависимости от угла θ ;
в) - экспериментальное распределение потока мюонов с учетом эффективности реконструкции треков;
г) - экспериментальное распределение потока мюонов с учетом эффективности реконструкции треков и за вычетом фонового распределения потока мюонов.

Распределения потоков космических мюонов удобно представить также в переменных $\cos\varphi \cdot \sin\theta : \sin\varphi \cdot \sin\theta$, определяющих наклон траектории мюона относительно нормали к плоскости детектора, чтобы детальнее рассмотреть все имеющиеся неоднородности. Экспериментальные результаты с учетом всех вышеописанных поправок, а также результаты симуляции с помощью пакета GEANT4 представлены на рисунке 4.13 а, б соответственно.

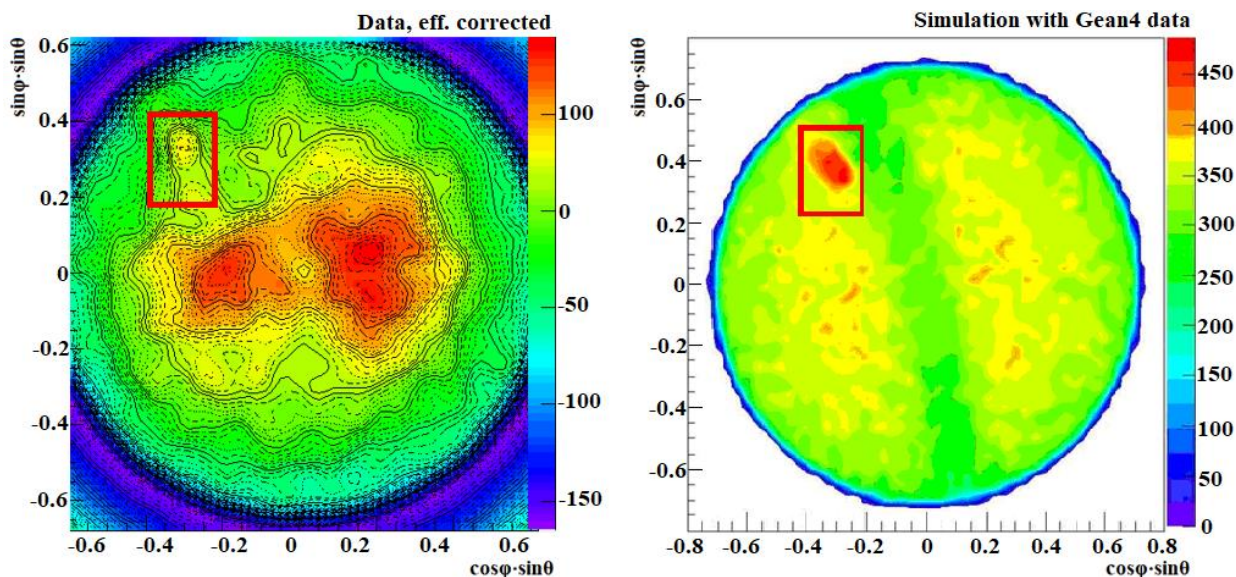


Рисунок 4.13 Распределение количества космических мюонов в системе координат $\cos\varphi \cdot \sin\theta : \sin\varphi \cdot \sin\theta$ в шахте на глубине 30 метров, рамкой отмечено положение шахты лифта: а) - экспериментальное распределение потока мюонов с учетом эффективности реконструкции треков и за вычетом фонового распределения потока мюонов; б) - усреднённое по азимутальному углу φ фоновое, сгенерированное в пакете GEANT4.

На обоих распределениях, представленных на рисунке 4.13 а,б отчетливо видна область, соответствующая положению шахты лифта (выделена красным прямоугольником) в диапазоне углов $\varphi=132^\circ$, $\theta=27^\circ$. Количество треков в каждом бине в зоне шахты лифта составляет от 60 до 100, т.е. представленные данные статистически обеспечены. Помимо шахты лифта, экспериментальное распределение наглядно демонстрирует дополнительное увеличение потока мюонов поперек коридора шахты лифта, что объясняется неоднородной плотностью вокруг исследуемого объекта, а именно тем, что исследуемый объект находится в линзе мраморовидного известняка, плотность которого в несколько раз отличается от плотности грунта.

Результаты мюонографических исследований массива горных пород были сопоставлены с результатами измерений коллег из Геофизической службы РАН в специальных сейсмических исследованиях распределения поля скоростей продольных волн. Сейсмические исследования включали проведение измерений с использованием двух сейсмических датчиков GS-1, из которых один располагался на земной поверхности, а второй - на постаменте в комнате, где располагались детекторы. Наземный датчик последовательно перемещался по

сети пунктов на поверхности. Регистрация возбуждаемых на земной поверхности сигналов выполнялась сейсмологическим комплексом ИСК-4 с частотой дискретизации 4000 Гц. Рисунок 4.14 иллюстрирует характер регистрации сейсмических сигналов на земной поверхности (верхняя трасса) и в шахте (нижняя). Запаздывание сигнала на нижней трассе связано с его пробегом в покрывающей 30-метровой толще. Величина запаздывания обратно пропорциональна скорости распространения продольной волны.

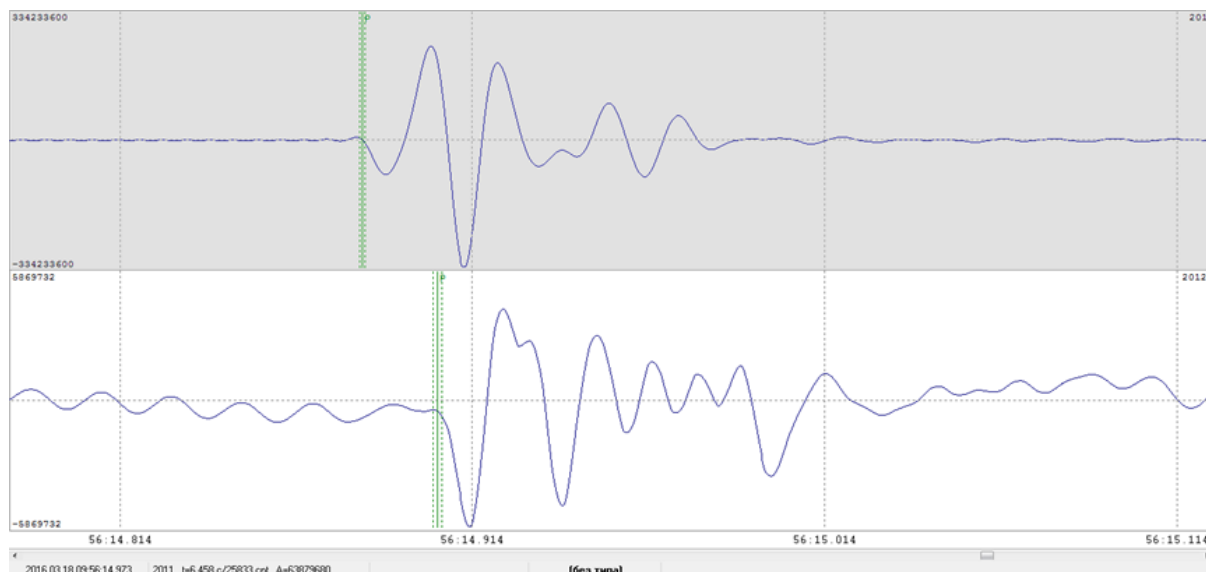


Рисунок 4.14 Регистрация сигналов сейсмологическим комплексом ИСК-4 с частотой дискретизации 4000 Гц.

Площадной анализ времен запаздывания позволил получить поле скоростей распространения продольной волны. По времени запаздывания первого вступления продольной волны на датчике, расположенном в шахте, относительно аналогичного вступления на наземном датчике оценивалась скорость распространения волны. Для измерения скорости прохождения волн рядом с датчиком на поверхности наносилась серия ударов кувалды и по времени первого вступления вычислялось время пробега сигнала. Сейсмические исследования, проведенные вышеописанным способом, имеют ряд ограничений по детализации информации, но полученные данные подтверждают экспериментальные мюнографические результаты.

4.3 Эксперимент в крепости Нарын-кала, Дербент

В сотрудничестве институтов ФИАН, НИТУ МИСИС, НИЯУ МИФИ и НИИЯФ МГУ проведена серия мюнографических экспериментов по исследованию памятников культурного наследия России, первой из которых стала работа в Дербенте. В архитектурном комплексе цитадели Нарын-Кала (г. Дербент, Дагестан), являющейся объектом всемирного наследия ЮНЕСКО, было обследовано подземное крестово-купольное сооружение. Объект исследования представляет собой сложенное из камня незаполненное грунтом крестово-купольное сооружение, уходящее на глубину 10 м от современного уровня земли. Постройка датируется IV-V в н.э. и, возможно, является древнейшим культовым христианским сооружением на территории России. Согласно одной из гипотез, до VII века н.э. изучаемое строение являлось наземной конструкцией, но впоследствии было засыпано снаружи землей и переделано в водохранилище.

Целью эксперимента было выяснить возможность изучения этого археологического объекта методом мюнографии, определить длительность оптимальной экспозиции, количество, размеры и расположение детекторов, получить первые изображения его внутренней структуры с помощью ядерных эмульсий. Наличие пустот, или наоборот, более плотных участков в стенах сооружения и примыкающем грунте, обнаруженных этим методом, может подтвердить одну из существующих гипотез о его назначении.

Эксперимент был проведен совместно с сотрудниками Института истории, археологии и этнографии ДНЦ РАН, Дагестанского государственного университета и при участии Агентства по охране культурного наследия Республики Дагестан [113,114].

Подземное крестово-купольное сооружение строго ориентировано по сторонам света. Здание построено из камня-ракушечника, имеет высоту («глубину») около 11 метров, протяженность с севера на юг 14,8 м и с запада на восток – 13,4 м (рис.4.15). Отсеки (рукава) креста имеют ширину около 4,7 м, длина трех рукавов - около 4,2 м; северный отсек имеет длину свыше 6 м. Рукава

перекрыты стрельчатыми сводами, а центральное пространство – проволочным ограждением купола диаметром 5 м.



а)



б)



в)

Рисунок 4.15 Фотография архитектурно-археологического комплекса цитадель Нарын-Кала
а) общий вид Дербентской крепости; б) внутренний вид разрушенного здания (фото сделано через купол); в) проволочное ограждение над куполом исследуемого здания в цитадели Нарын-Кала, стрелкой показано место экспозиции -под куполом- мюнографических детекторов.

В историческую и справочную литературу данное сооружение вошло как подземное водохранилище, каковым, предположительно, оно являлось в XVII-

XVIII вв. [115]. Как говорят археологи, начинавшие раскопки, это здание во время постройки было целиком на поверхности, и оно стоит на наиболее высокой точке Нарын-кала. Ставить цистерну на поверхности, да еще на самой высокой горе? Это, по меньшей мере, странно. Именно поэтому российскими археологами было высказано мнение, что данное сооружение первоначально являлось раннехристианской церковью V-VI вв. [116,117], а дагестанскими археологами - зороастрийским храмом огня [118]. Основными доводами для интерпретации назначения данного здания, как первоначального культового сооружения, послужили необычная для водохранилищ, но характерная для ранних церквей и храмов крестообразная форма здания, строго ориентированного по сторонам света, и отсутствие водовода внизу здания. Однако имеются и противоречащие данным суждениям аргументы: не доказано, что это сооружение было наземным, не определена его датировка и не доказано его существование в V-VI веках. Отдельно стоит отметить необходимость исследования этого сооружения неразрушающими культурный слой методами.

Сооружение почти полностью скрыто культурным слоем толщиной около 7,5 м; на современной поверхности видны лишь фрагмент полуразрушенного купола (рис.4.15 в) и окно для подъема воды в торце северного отсека (рукава). Изучение его традиционными методами - при помощи археологических раскопок - представляется весьма затруднительным, поскольку неизвестно, как поведут себя при освобождении от грунта стены здания, длительно подвергавшиеся воздействию воды. К тому же масштабные раскопки нарушат сложившийся исторический ландшафт цитадели, выявят прилегающие архитектурные комплексы различных периодов Средневековья, требующие их сохранения и консервации. При таких условиях метод мюнографии является единственно возможным подходом для изучения этого архитектурного и археологического объекта. Наличие пустот, или наоборот, более плотных участков в стенах сооружения и примыкающем грунте, обнаруженных этим методом, может подтвердить одну из существующих гипотез о его назначении.

Для использования мюнографической методики при выделении контуров здания на фоне грунта необходимо, чтобы различие в плотности камня, из которого построено здание, и окружающей его породы было около 5%. Всего в данном эксперименте было использовано 5 эмульсионных детекторов: 4 были направлены на стены сооружения, а один - вверх, для измерения вертикального потока мюонов. В соответствии с анализом топографических карт детекторы с фотоэмульсией были расположены внутри объекта как показано на рисунке 4.16.

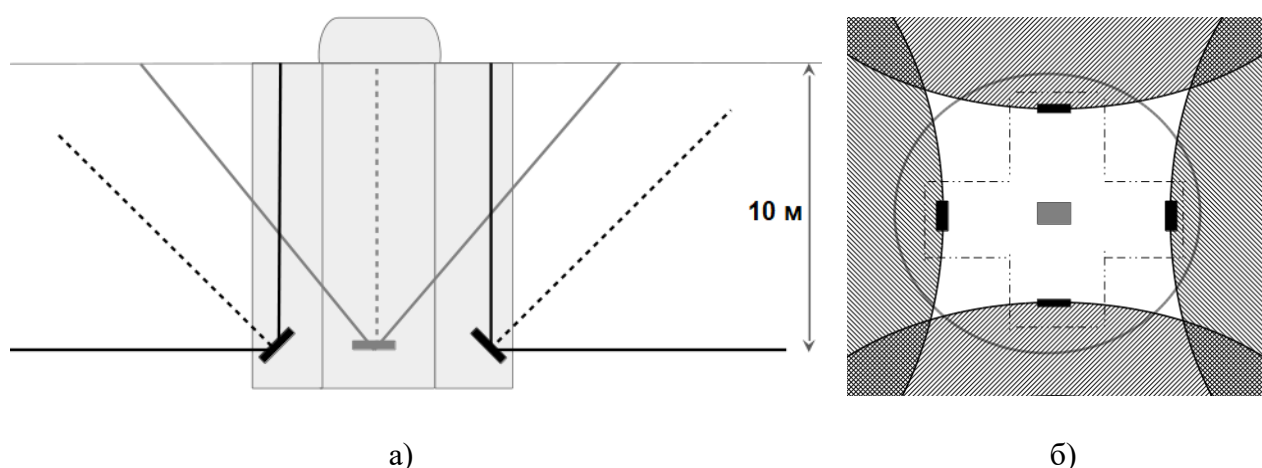
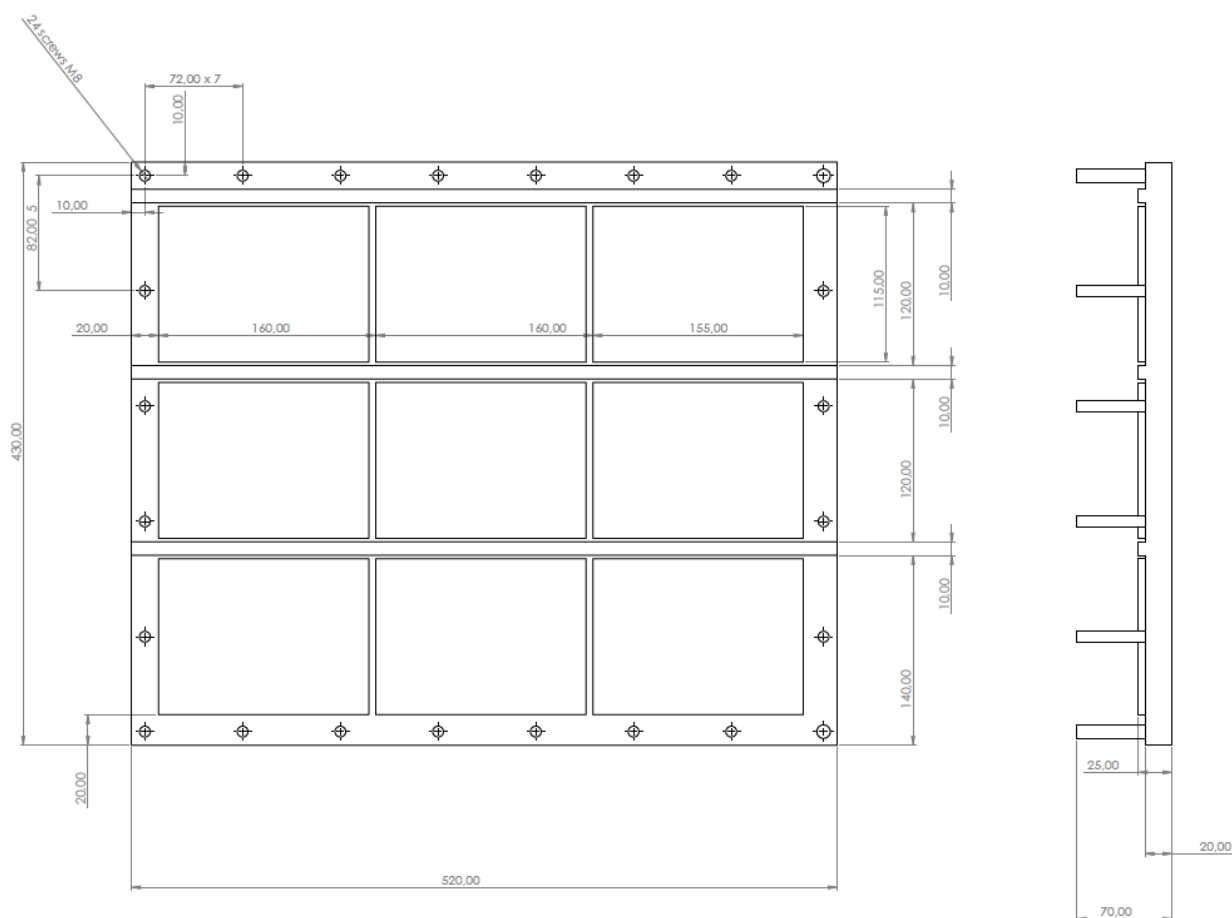


Рисунок 4.16 Схема установки детекторов в исследуемом сооружении: а) - схематический вид сбоку: центральный детектор для измерения вертикального потока мюонов, боковые - для "просвечивания" стен, направляющие конусы обозначают области, видимые каждым из детекторов. б) - вид сверху.

Регистрация мюонов в телесных углах, обозначенных на рис. 4.16, осуществлялась трековыми детекторами элементарных частиц, собранными из слоев двусторонней ядерной эмульсии размером $10 \times 12.5 \text{ см}^2$ из эксперимента OPERA. В эксперименте было использовано 5 эмульсионных детекторов: четыре детектора были направлены на стены сооружения, и один направлен на вверх для измерения вертикального фонового потока мюонов. Сборочный чертеж, внешний вид и конструкция детекторов, используемых в эксперименте, представлены на рисунке 4.17.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.17 а) Сборочный чертеж конструкции детектора, размеры приведены в миллиметрах; б) фото укладки девяти эмульсионных стопок в светонепроницаемые пакеты и их положение внутри рамки детектора; в) – внешний вид детектора с соответствующей разметкой в собранном виде; г) – фото детектора на месте экспозиции.

Конструкция детектора для данного эксперимента представляла из себя металлическую панель размером 43 см × 52 см, на которой жестким образом были закреплены 9 стопок фотоэмульсий (пять эмульсионных слоев в каждой стопке),

упакованных в специальные свето- и водонепроницаемые пакеты, см. рис. 4.17 - 4.18. Верхняя и нижняя панели детектора скреплялись между собой 24 болтами, что обеспечивало неподвижность эмульсионных стопок внутри детектора во время экспозиции. На верхней “крышке”-панели была наклеена специальная пористая резина во избежание механической деформации при сборке детектора. Каждый детектор и каждая эмульсия, входящая в его состав, имели свой уникальный идентификационный номер, что позволило в процессе обработки экспериментальных данных работать в единой системе координат.

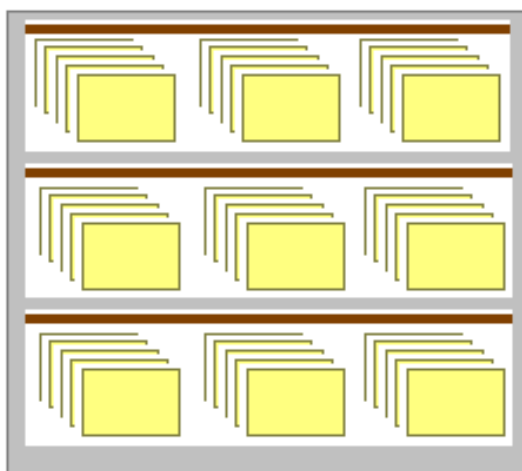


Рисунок 4.18 Схематическое изображение расположения эмульсионных пластин в детекторе.

После сборки и упаковки, детекторы были закреплены на специальные подставки, обеспечивающие неподвижность всей конструкции, и установлены на место экспозиции.

Поскольку материал стен сооружения и их толщина точно неизвестны, было проведено предварительное моделирование прохождения мюонов через здание и их регистрации эмульсионным детектором с несколькими значениями толщины и плотности стен. Моделирование прохождения потока мюонов для эксперимента проводилось с учетом конструкции эмульсионного детектора на основе программного пакета GEANT4. При определении геометрии пространства внутри исследуемого здания - ширин и длин коридоров и купола - были использованы размеры, указанные на рис. 4.19.

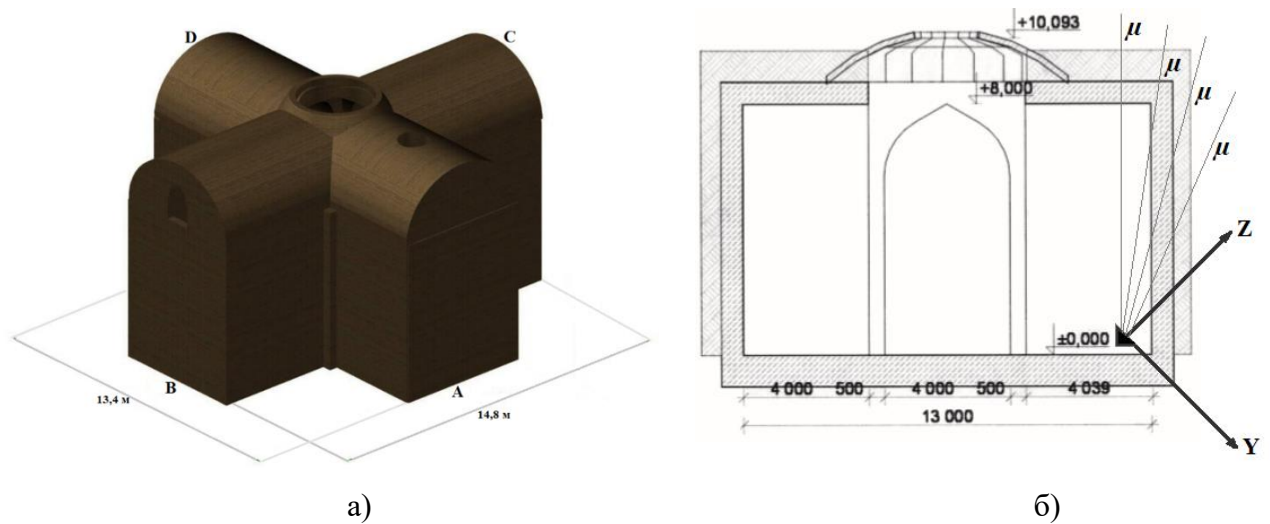


Рисунок 4.19 а) – компьютерная реконструкция крестово-купольного сооружения (GEANT4), буквами *A, B, C, D* показаны отсеки здания, где были расположены эмульсионные детекторы, детектор *B* имеет направление на север, *C* – на юг; б) - вид крестово-купольного сооружения в разрезе.

В модельных расчетах в качестве материала грунта был выбран суглинок плотностью 1.78 г/см^3 , для материала стен был взят песчаник с двумя вариантами плотности: 2.00 г/см^3 и 2.65 г/см^3 . Исходные импульсы мюонов были разыграны согласно экспериментально полученному распределению [79], зависимость от зенитного угла θ была аппроксимирована функцией $F(\theta) \sim \cos^2(\theta)$. Для азимутального угла φ использовалось равномерное распределение.

В расчетах было принято пороговое значение - минимальный импульс, выше которого частица проходит через вещество без остановки. Его значение зависит от количества вещества на пути частицы и, соответственно, меняется в зависимости от угла наблюдения. Поэтому при моделировании из всего исходного спектра мюонов используется часть, определяемая величиной этого минимального импульса. Величина регистрируемого потока частиц зависит от количества пройденного вещества. Так, для песчаника плотностью 2.3 г/см^3 при прохождении через 3 м, 5 м и 10 м поток ослабляется на 35%, в два с половиной раза и 5 раз при значениях минимального импульса $1,56 \text{ ГэВ/с}$, $2,6 \text{ ГэВ/с}$ и $5,25 \text{ ГэВ/с}$, соответственно.

При прохождении потока частиц через слой вещества любой толщины, вплоть до нескольких километров, на выходе будут присутствовать частицы с

небольшой энергией - те, которые при входе в вещество имели импульс, близкий к минимальному. Они рассеиваются довольно сильно и влияют на распределение потоков зарегистрированных частиц по угловым переменным. Чтобы учесть размытие распределения таких частиц из-за многократного рассеяния, и для оптимизации времени, затраченного на моделирование, был разработан специальный алгоритм, который уменьшает влияние этого механизма.

На рисунке 4.20 в качестве примера приведены результаты моделирования детектора установленного в центре крестово-купольного сооружения двумерных распределений потока мюонов в различных системах координат.

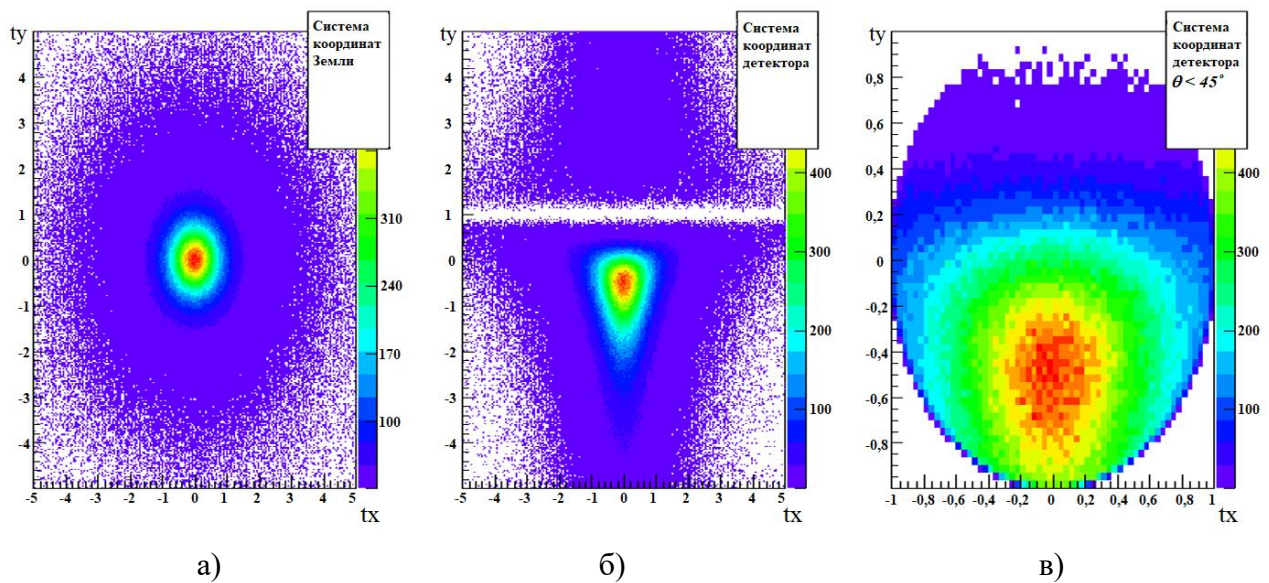
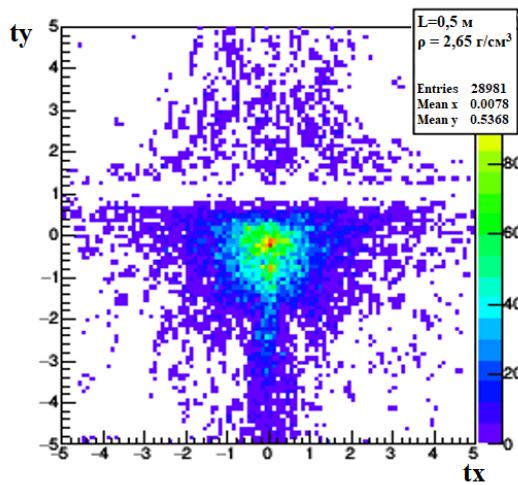
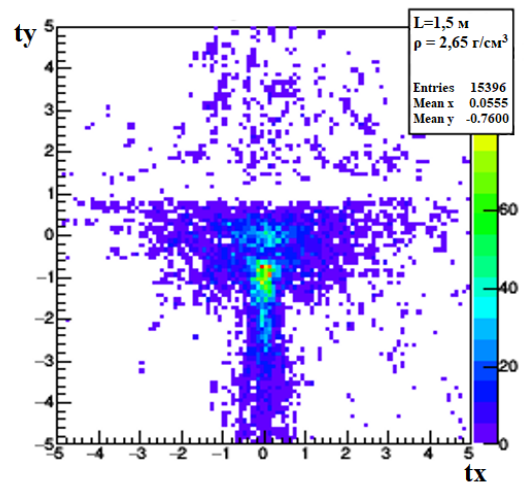


Рисунок 4.20 Угловые распределения исходного спектра частиц: а) - в системе координат земли; б) - в системе координат эмульсионного детектора; в) - в системе координат детектора, показаны только углы $\leq 45^\circ$ (те, что реконструируется в детекторе).

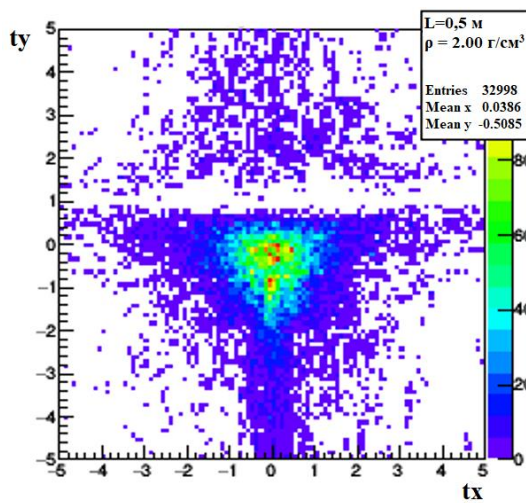
На рисунке 4.21 приведены результаты моделирования, выполненные с помощью GEANT4, в виде распределений числа мюонов, зарегистрированных эмульсионными детекторами в переменных tx и ty ($tx = \frac{dx}{dz} = tg\theta \cos \phi$, $ty = \frac{dy}{dz} = tg\theta \sin \phi$) при разных величинах толщины стен L и плотности стен ρ .



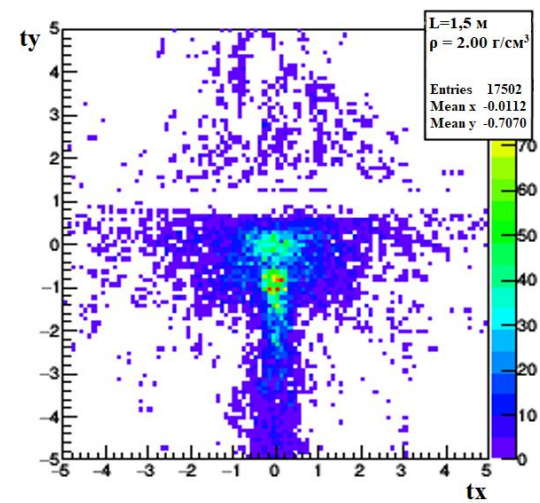
а)



б)



в)

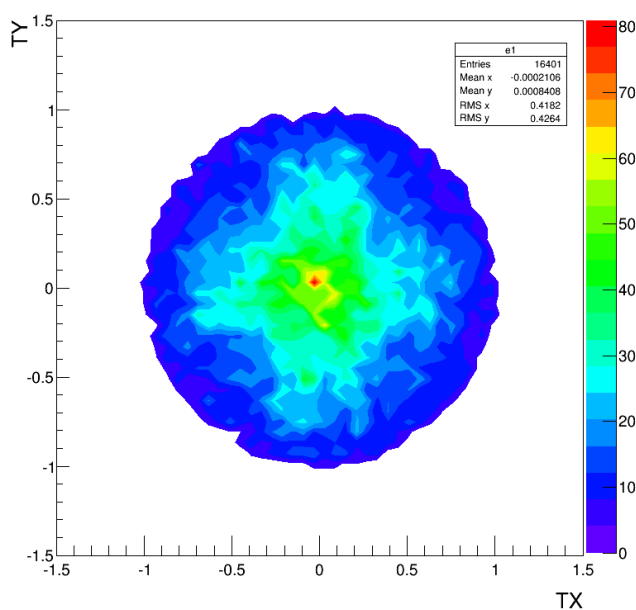


г)

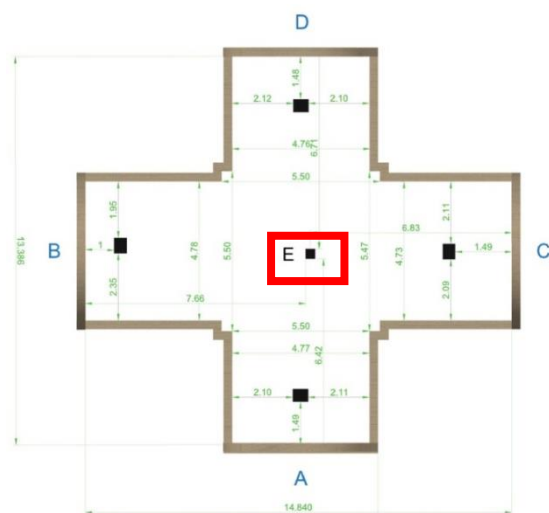
Рисунок 4.21 Результат моделирования числа мюонов, зарегистрированных эмульсионными детекторами, представленный в угловых переменных tx и ty . Угловое распределение tx - ty числа треков, попавших в детектор в системе координат эмульсии при разных величинах толщины стен и плотности: а) $L=0,5 \text{ м}$, $\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$; б) $L=1,5 \text{ м}$, $\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$; в) $L=0,5 \text{ м}$, $\rho = 2,00 \text{ г/см}^3$; г) $L=1,5 \text{ м}$, $\rho = 2,00 \text{ г/см}^3$.

Данные моделирования наглядно демонстрируют изменения угловых распределений при различной плотности и толщине стен исследуемого объекта при одной и той же конфигурации детектора.

Рисунок 4.22а демонстрирует экспериментальные результаты для детектора, который был расположен в центре здания, на рис.4.22б показано расположение детектора при экспозиции.



а)



б)

Рисунок 4.22 а) – экспериментальное распределение потока мюонов для детектора Е, расположенного в центре здания (отмечено красной рамкой, на рис.4.22 б); б) - схема расположением детекторов (вид сверху).

Данные, представленные на рис.4.22а наглядно демонстрируют крестообразную структуру исследуемого помещения. Из сравнения полученного экспериментального распределения с расчетным можно заключить, что приведённый результат наиболее близок к варианту моделирования с параметрами стен $L=1.5$ м и $\rho=2.65$ г/см³, где L - толщина стен, а ρ - их плотность. Полученные данные позволили определить геометрические размеры и плотность стен постройки [91]. По результатам первого эксперимента, сделан основной вывод о применимости метода мюонографии для исследования. Обнаружение особенностей структуры археологического объекта и основных физических характеристиках стен здания является свидетельством необходимости проведения последующих экспозиций эмульсионных детекторов на исследуемом объекте, с учетом имеющихся технических ограничений. Предпочтительной является установка детекторов на западном склоне крепости вне стен здания для получения его полномасштабного подземного изображения. Основным результатом таких исследований станет томограмма подземного крестово-купольного здания в крепости Нарын-Кала, которая поможет решить

вопрос о назначении этого необычного строения, провести анализ его состояния и выработать рекомендации к плану возможных раскопок.

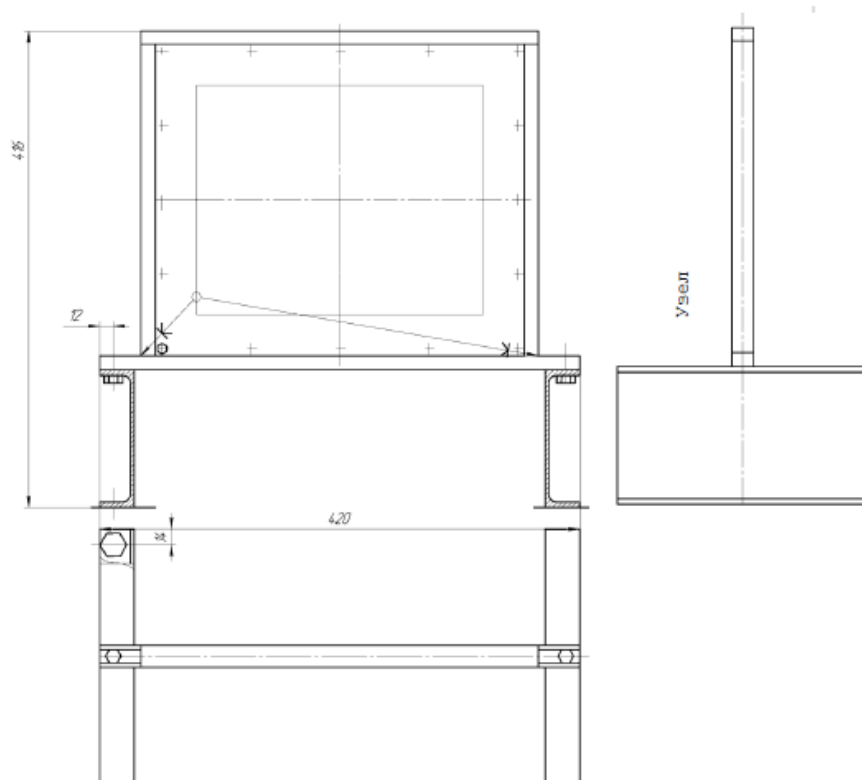
4.4 Мюонографические исследования в Свято-Троицком Даниловом монастыре, Переславль-Залесский

Эксперимент по изучению скрытой структуры зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря стал следующим этапом применения мюонографии в России для исследования объектов культурного наследия. За долгую историю основанного в г. Переславле-Залесском в 1508 году комплекса построек монастырь неоднократно реконструировался, а историческая документация, включающая планы построек, была безвозвратно утеряна. Учитывая ограниченную возможность проведения раскопок из-за статуса монастыря как объекта культурного наследия федерального значения, применение в данном случае неинвазивного метода мюонографии стало единственно возможным способом исследования. Предметом изучения в данном эксперименте стали здания Церкви Похвалы Божьей Матери (ЦПБМ) и Церкви Всех Святых (ЦВС), а также территория между ними (рис.4.23).

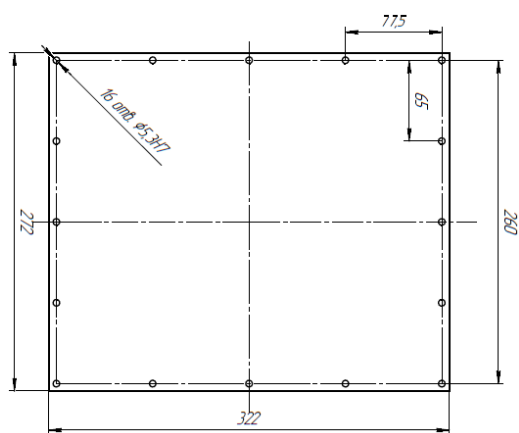


Рисунок 4.23 Территория Свято-Троицкого Данилова монастыря. Цифрами обозначены области исследований: 1 – подвалы здания Церкви Похвалы Божьей Матери и прилегающая территория; 2 – возможные остатки старого фундамента вблизи здания Церкви Всех Святых; 3 – участок территории между зданиями церквей; 4 - Троицкий собор.

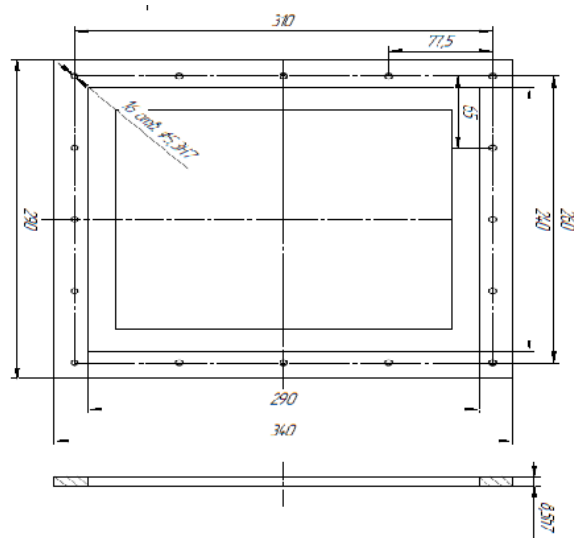
Была разработана новая конструкция детекторов, обеспечивающая жесткую фиксацию эмульсионных слоев в вертикальном положении. Регулируемые ножки детектора давали возможность выравнивать положение детектора по уровню. Схема конструкции и внешний вид детекторов, используемых в данном эксперименте представлены на рисунке 4.24.



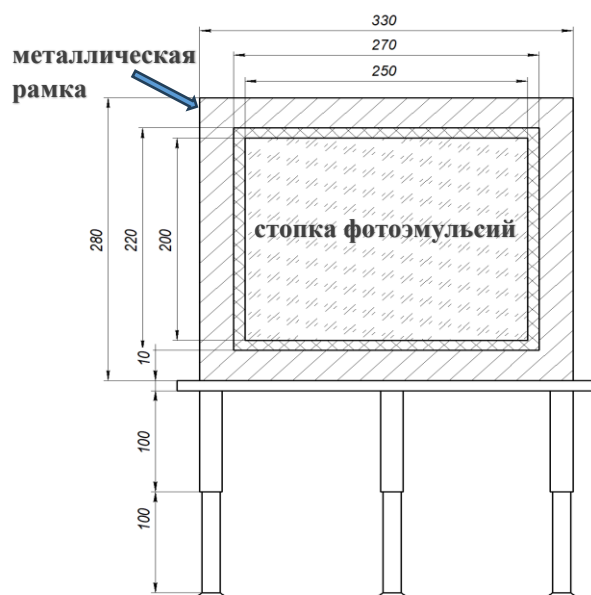
a)



б)



в)



г)

д)

Рисунок 4.24 Сборочный чертеж для а) детектора, б) крышки детектора, в) алюминиевой рамы, г) - принципиальная схема конструкции детектора с фотоэмульсионными слоями, указанные на схеме размеры конструкции представлены в миллиметрах; д) – внешний вид собранных детекторов, готовых к установке на объекте.

Детектор включает в себя следующие комплектующие: алюминиевая рама, сплав АМГ6, размер: 340x290 мм – 1шт.; крышка, сталь 06КП, размер: 272x322 мм – 2шт.; алюминиевая платформа для рамы – 1шт., регулируемые ножки – 3 шт.; пористая листовая резина на основе вспененного EPDM каучука EPDM 150, толщина 4-5 мм, размер: 260x290 мм – 1шт..

Форма опорной площадки детектора позволяла однозначно ориентировать детектор в направлении «вперёд-назад» по отношению к исследуемой области. Фотографии нескольких детекторов, установленных на месте экспозиции в одном из подвальных помещений ЦПБМ, приведены на рис. 4.25. Положение детекторов контролировалось по уровню.



Рисунок 4.25 Пример установки детекторов первой экспозиции в открытых подвалах ЦПБМ.

Для определения точного взаимного положения детекторов между собой была произведена лидарная съёмка, что позволило создать цифровую 3D-модель видимой части исследуемых объектов, см. рис. 4.26 а, б) и определить взаимное положение детекторов с сантиметровой точностью. На рисунке 4.26 в) показан внешний вид пользовательского окна для работы с установленными детекторами, программа которого позволяет визуально просмотреть положение детектора, выбрать необходимый диапазон углов и т.д.

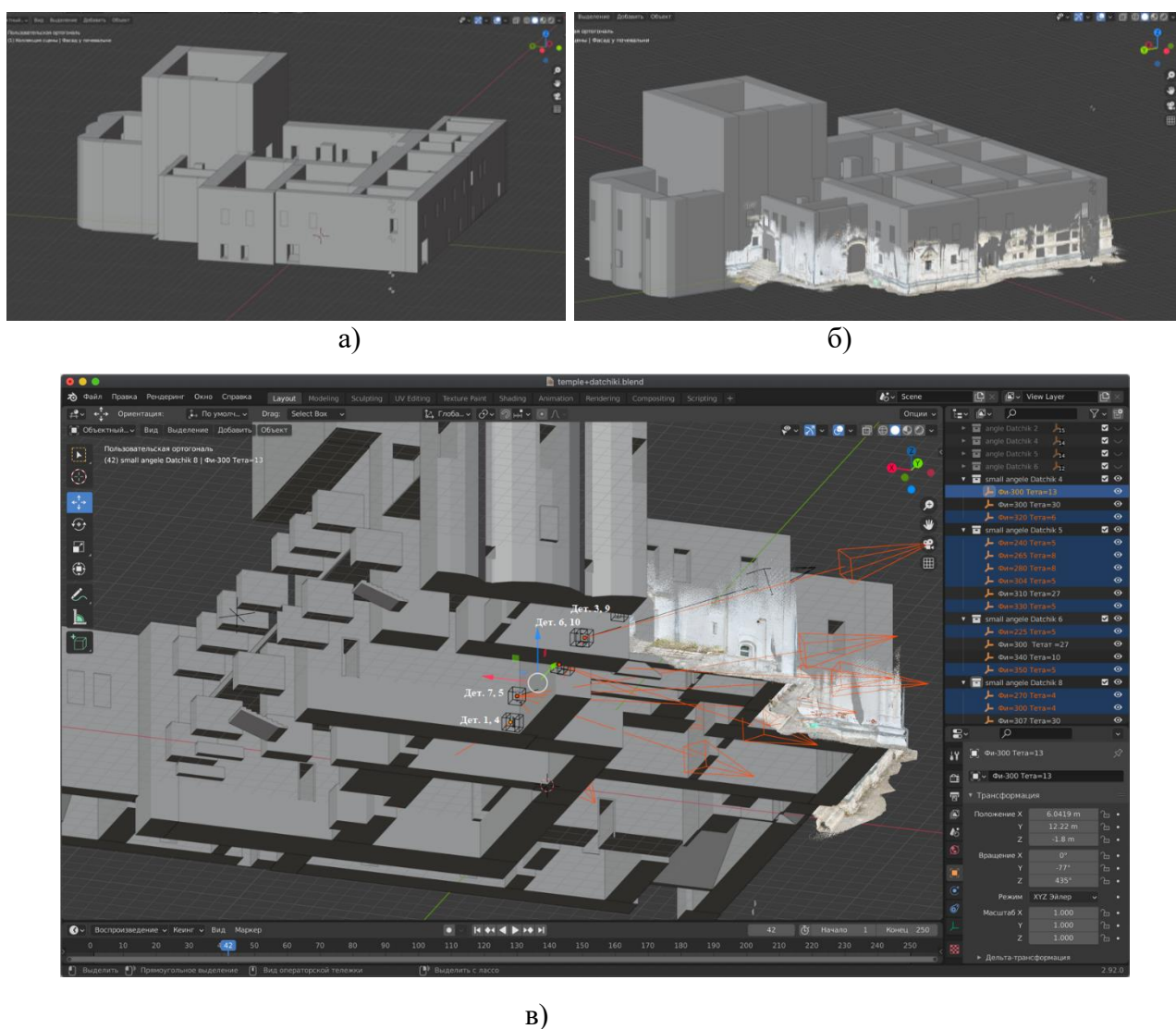
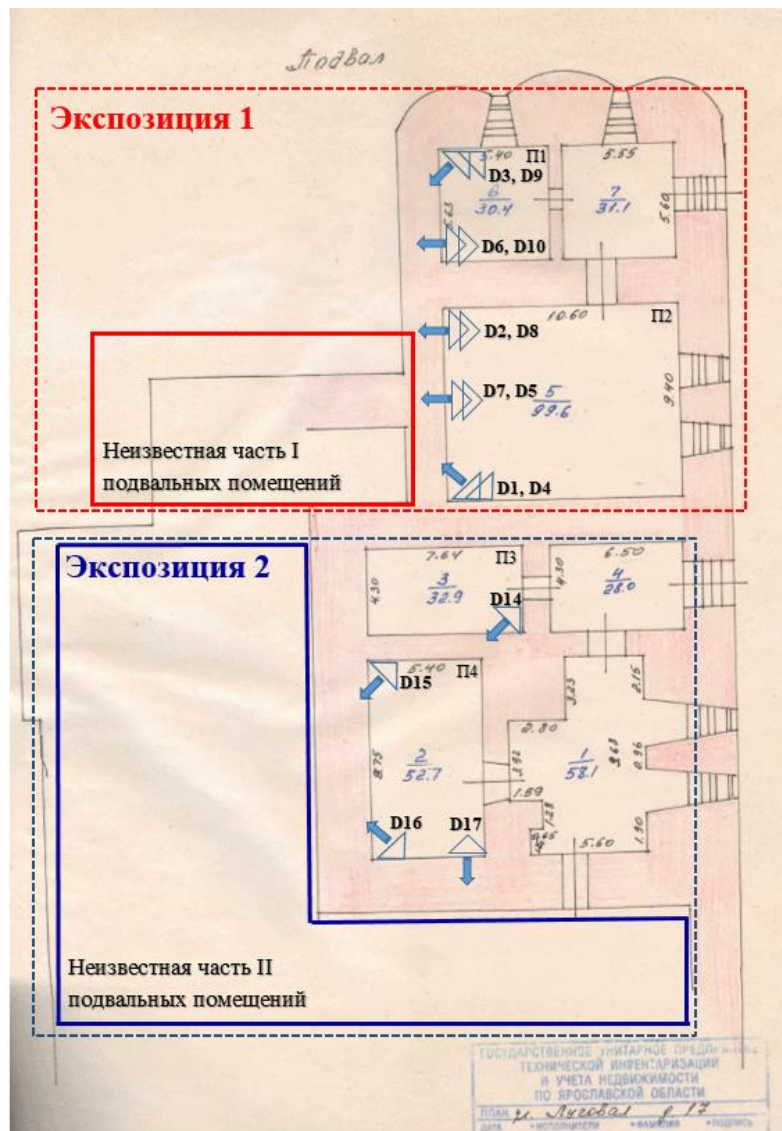


Рисунок 4.26 3D-модель здания ЦПБМ а) по планам БТИ; б) по планам БТИ + лидарная съёмка; в) пример пользовательского окна 3D-модели с расположением детекторов.

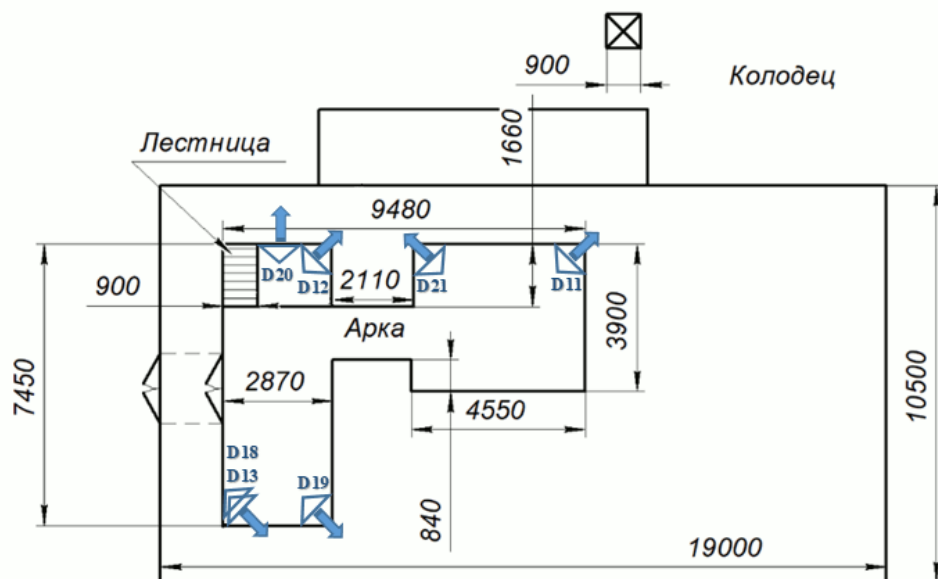
Эмульсия, использованная в эксперименте, была произведена российской компанией ООО “СЛАВИЧ”. Плотно упакованные стопки из шести двухсторонних эмульсионных пластин были закреплены в неподвижном положении с помощью металлической рамки детектора. Всего был

проэкспонирован 21 эмульсионный детектор: десять на первом этапе эксперимента (с ноября 2020 г по февраль 2021 г) и одиннадцать - на втором (три детектора с декабря 2020 г по апрель 2021 г и 8 детекторов с июня по сентябрь 2021 г), в общей сложности порядка 3 м² эмульсии. В первой экспозиции применялись сборные пластины размером 20 × 25 см², а во второй – 10 × 12,5 см². Для мониторинга количества зарегистрированных частиц на лицевую часть детекторов в первой экспозиции были помещены дополнительные упаковки по 2 слоя фотоэмульсии меньшего размера. Большая площадь эмульсионных слоёв в первой экспозиции связана с тем, что детекторы находились на одном уровне с предполагаемыми подвалами, т.е. регистрировали мюоны, падающие под малыми углами к горизонту. Интенсивность потоков таких мюонов значительно ниже, чем падающих вертикально, поэтому для обеспечения статистической достоверности данных было принято решение использовать детекторы с увеличенным геометрическим фактором. Результаты обработки первой партии детекторов продемонстрировали возможность получить достаточную статистическую обеспеченность данных при меньшей площади детекторов.

На рис. 4.27 показаны планы подвалов Церкви Похвалы Божьей Матери (ЦПБМ) (рис. 4.27 а) и Церкви Всех Святых (ЦВС) (рис. 4.27 б) с расположением детекторов на двух этапах экспозиции. Глубина обоих подвалов составляет около 3 м. На плане Бюро технической инвентаризации показан подвал ЦПБМ, где схематично обозначены замурованные части помещений с неизвестной структурой. Детекторы были установлены таким образом, чтобы «увидеть» эти скрытые части подвальных помещений и при этом исключить влияние «тени» от Троицкого собора, расположенного рядом с ЦПБМ (цифра 4 на рис. 4.23). Детекторы, установленные в ЦВС, были нацелены на поиск фрагментов старого фундамента и исследование участка между зданиями церквей (цифра 3 на рис. 4.23), где предположительно могут находиться древние захоронения.



а)



б)

Рисунок 4.27 Схемы установки детекторов: а) – экспозиции в подвальных помещениях ЦПБМ (П1-П4); б) – экспозиции в подвальных помещениях ЦВС.

Необходимым этапом эксперимента, осуществляемого методом мюнографии, является моделирование распределения мюонных потоков в исследуемой области и формируемого этими потоками отклика детектора. Для описания процесса прохождения мюонов через сложные объекты используется алгоритм, описанный в [103], в соответствии с которым создаётся пространственная модель объекта с указанием положения детектора и совмещённого с ним начала координат. Из точки начала координат проводятся воображаемые лучи, проходящие через объект и имитирующие траектории мюонов, направления которых задаются азимутальным углом φ и зенитным углом θ . Затем определяются точки пересечения этих лучей с границами элементов объекта и определяются длины пробега мюонов в этих элементах с учётом образующих их материалов. Исходный поток мюонов, проходя через слой материала, ослабляется в результате поглощения. Зная длину пути в материале и энергетический спектр мюонов, можно определить ослабление потока и получить расчётный поток мюонов, регистрируемых детектором на выходе из объекта. При моделировании используются следующие параметры: форма энергетического спектра потока мюонов из [79,119], при этом предполагается отсутствие зависимости исходного потока от азимутального угла φ . В расчётах сектор обзора детектора был принят равным 90° по обоим углам. Мюоны, падающие на объект, теряют энергию по-разному, в зависимости от направления (φ, θ). Вследствие этого в различной степени ослабевает мюонный поток. По зависимости ослабления потока от направления можно судить о распределении материала внутри объекта. В итоге результатом моделирования, также, как и результатом эксперимента, является количество мюонов, зарегистрированных детектором в элементе телесного угла $(\Delta\varphi, \Delta\theta)$ в определённом направлении (φ, θ).

Моделирование проводилось для всех задействованных в эксперименте детекторов с учётом их расположения на объекте. В качестве примера приведен результат моделирования для детектора, установленного в подвальном

помещении ЦПБМ (детектор 6), для случая, когда в его секторе обзора находилась гипотетическая скрытая подземная комната. На рис. 4.28 даны горизонтальная и вертикальная проекции схемы модельного эксперимента для одного из детекторов. В замурованной части подвальных помещений под землей была добавлена скрытая комната, существование которой предполагалось на начальном этапе работ (отмечена красной квадратной рамкой) на всех трех рисунках 4.28.

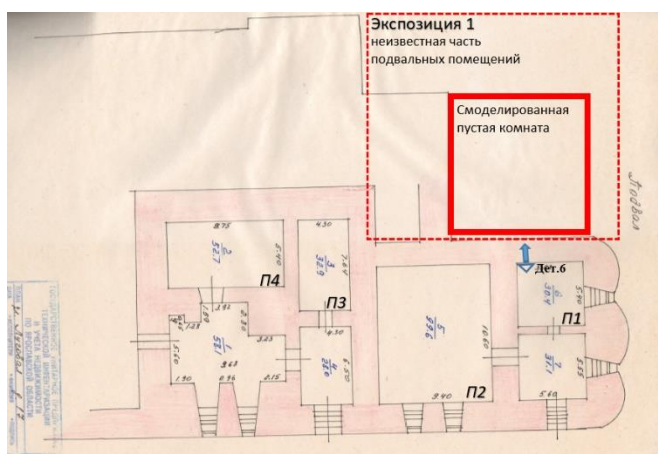
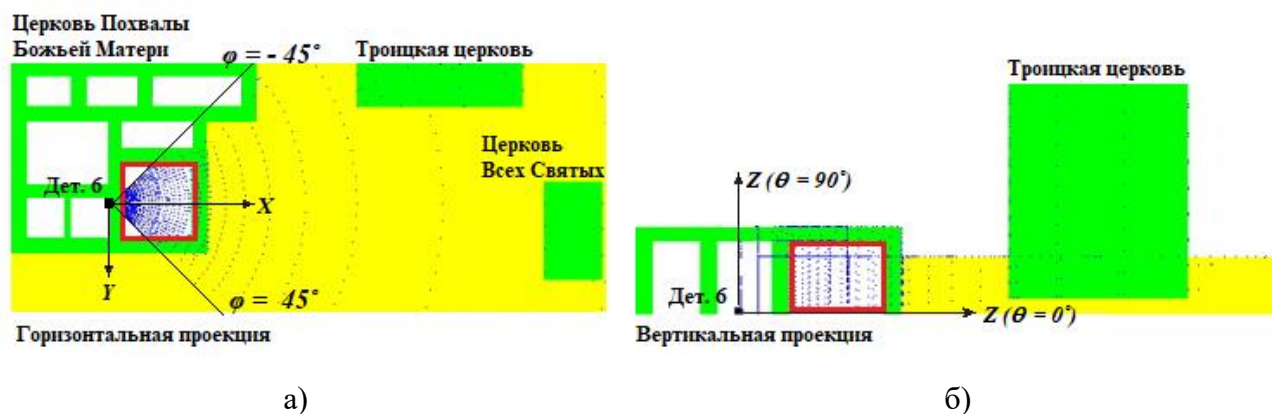


Рисунок 4.28 Расположение подвальных помещений церкви Похвалы и условные изображения близлежащих церквей. а)- горизонтальный разрез; б) – вертикальный разрез. Зелёным цветом обозначены стены, жёлтым – грунт, синие точки – места пересечения границ материала мюонами, красной квадратной рамкой отмечена гипотетическая скрытая комната; в) - схемы расположения смоделированной комнаты и детектора 6 на плане БТИ в подвальных помещениях ЦПБМ.

На рисунке 4.29 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.

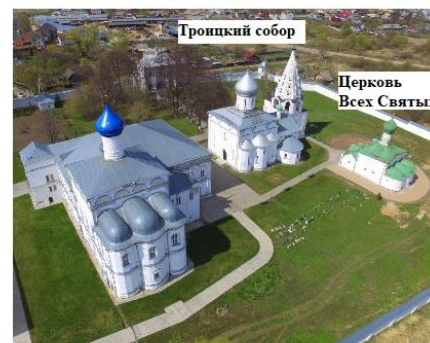
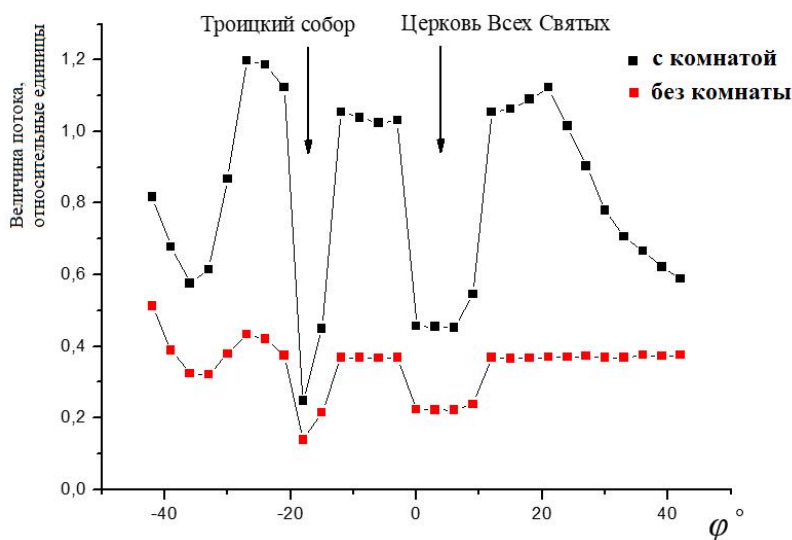


Рисунок 4.29 Ожидаемое распределение потоков мюонов в детекторе 6 при наличии (чёрные точки) и при отсутствии (красные точки) подземной комнаты, полученное для фиксированного угла $\theta = 45^\circ$; справа фото архитектурного ансамбля с указанием строений, которые дают «тени».

Другой проблемой при исследовании скрытой части подвала ЦПБМ было влияние на распределение потоков мюонов соседних стен и проёмов, которые могли формировать сложную картину «теней». Для выяснения того, как различные конфигурации внутренних элементов помещения влияют на распределения мюонов в детекторе, была построена модель подвалов, включающая видимые стены подвала, элементы первого этажа с перекрытиями, дверями и окнами, а также окружающий грунт. Для сравнения полученных распределений при моделировании неизвестной части подвала применялись различные конфигурации перекрытий и дверей. Распределения плотности потоков мюонов отражают сложную конфигурацию неизвестной части подвала. На схеме рис. 4.30 а, б показаны два возможных варианта взаимного расположения детектора 17 и части скрытой стены, имеющей угол. Точками показаны места пересечения границ стен, перекрытий - зелёный цвет и грунта -

жёлтый цвет. Положение осей X и Y соответствует положению, принятому при моделировании. На рис. 4.30 в, г представлены полученные распределения по углу φ числа мюонов в элементе телесного угла для рассмотренных конфигураций в относительных единицах.

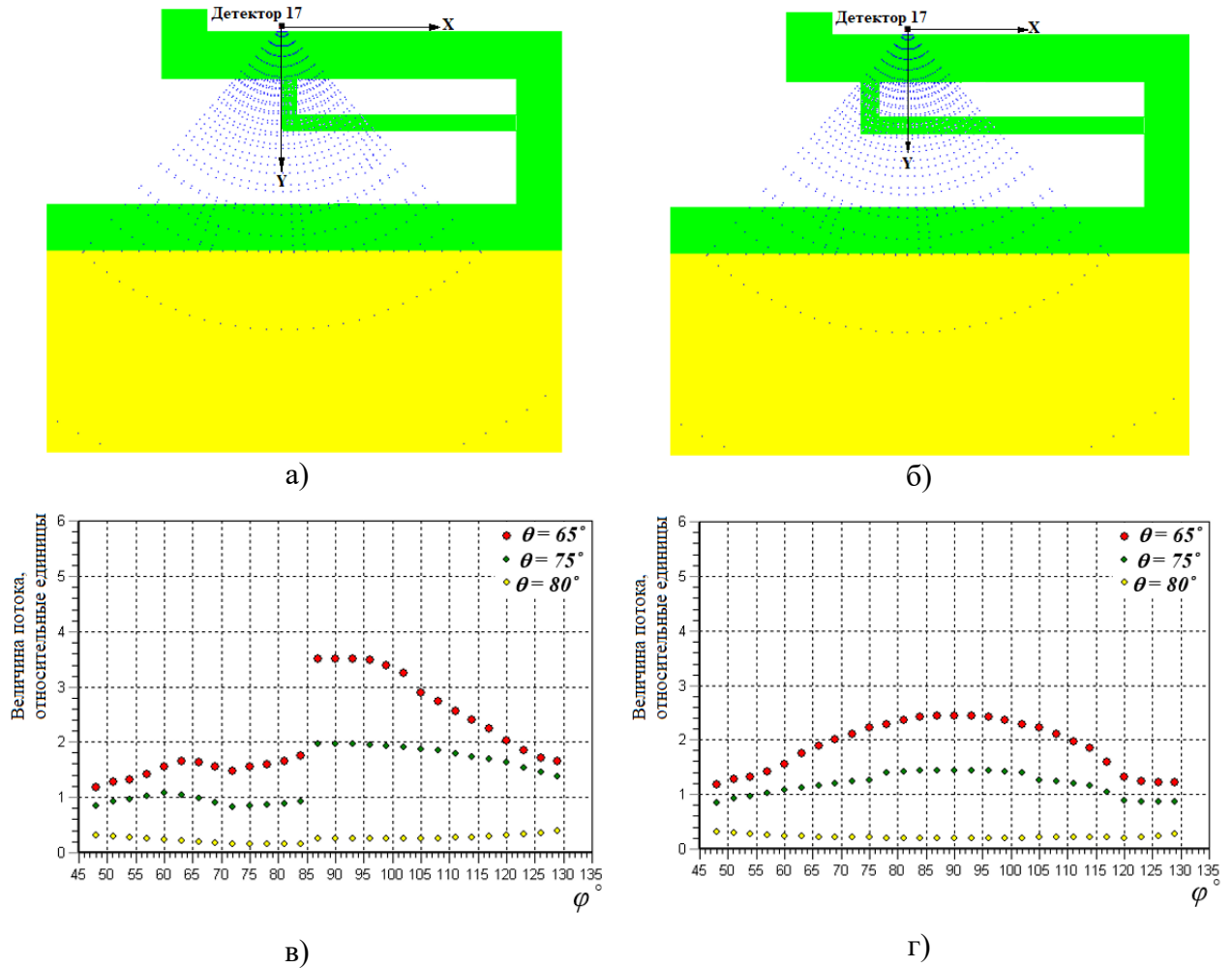


Рисунок 4.30 Модельный расчет для детектора 17 а) начало координат напротив угла стены, б) начало координат в стороне от угла стены; в, г) распределение по углу φ числа мюонов в элементе телесного угла при трех фиксированных значениях зенитного угла θ для двух положений детектора, представленных на рисунке а) и б) соответственно.

Как видно из рис. 4.30, даже незначительное изменение относительного положения детектора и стены приводит к существенному изменению характера распределений. В модель также была добавлена дополнительная стена, расположенная поперёк подвала, в двух вариантах - стена сплошная и стена с дверью см. рис. 4.31.

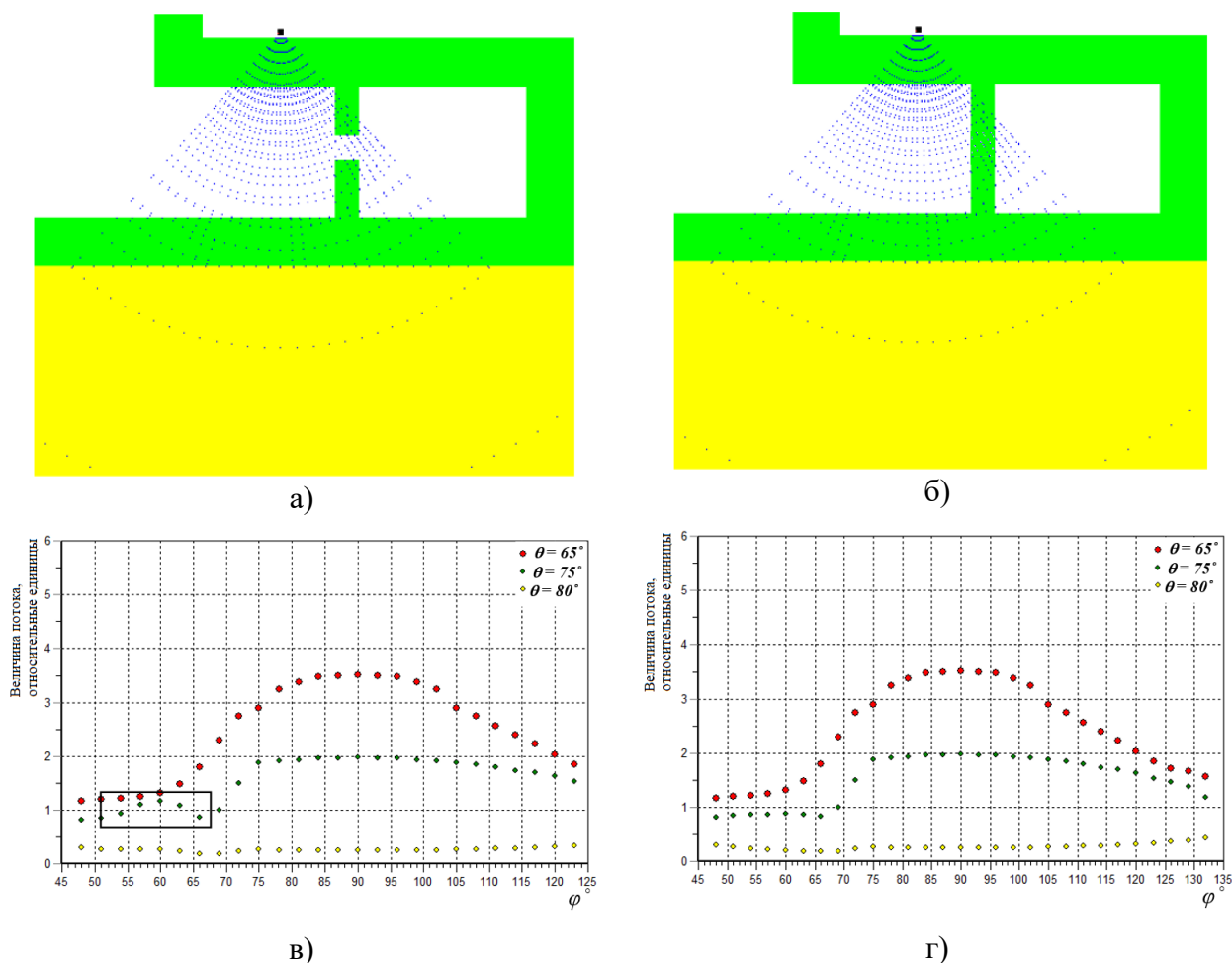


Рисунок 4.31 Модельный расчет зависимости потока мюонов от угла φ при фиксированном угле θ : а) стена с дверью, прямоугольной черной рамкой отмечен эффект влияния двери, б) стена без двери.

На рис. 4.31 приведён результат «зондирования» подвала мюонами при наличии двери в стене и при ее отсутствии. Наблюдается значительное уменьшение числа частиц при малых углах за счёт их поглощения в дополнительной стене. Добавление двери даёт незначительное увеличение в области углов $\varphi \sim 55^\circ \div 65^\circ$, т.к. частицы проходят её под углом (отмечено прямоугольником) на рис. 4.31 в). Ещё один вариант с дополнительной стеной, расположенной на этот раз вдоль подвала, включал три положения двери по отношению к детектору. На рис. 4.32 показаны все три варианта модели вместе с результатами моделирования для этих случаев. Видно, что результат сильно зависит от взаимного расположения двери и детектора. В случае, когда луч, проходящий через дверь, перпендикулярен стене (рис. 4.32 а), наблюдается резкий выброс на распределении частиц. Однако, чем больше угол луча по

отношению к дверному проёму отклоняется от перпендикуляра (рис. 4.32 б, в), тем меньше выражен сигнал.

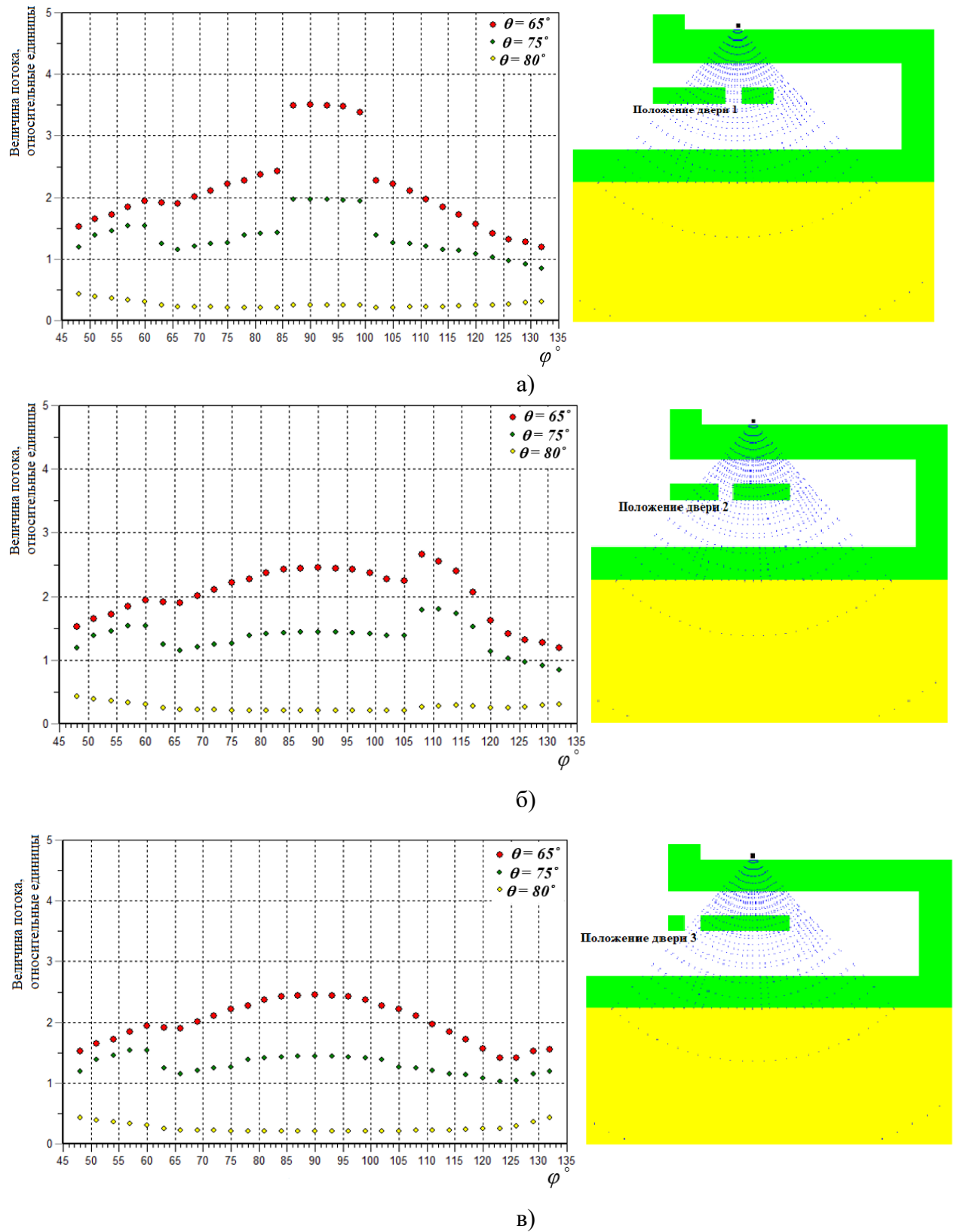


Рисунок 4.32 Моделирование предполагаемой дополнительной продольной стены с дверью, по-разному расположенной по отношению к детектору.

Эти и аналогичные им модельные расчеты были использованы при анализе отклика эмульсионных детекторов в эксперименте по изучению скрытой структуры зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря с использованием методики мюнографии.

По окончании экспозиции в зданиях монастыря фотоэмульсионные слои были проявлены ООО “СЛАВИЧ” и отсканированы на микроскопах измерительного комплекса ПАВИКОМ. В online режиме реконструировались координаты (X_D , Y_D , Z_D) и углы θ_D , φ_D мюонного трека в каждой отдельно взятой пластине в диапазоне зенитных углов $\theta_D = \pm 45^\circ$ относительно нормали к плоскости детектора. см. рис. 4.33.

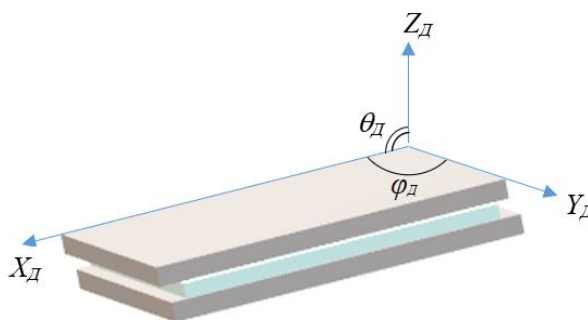


Рисунок 4.33 Схематическое изображение осей координат и углов в системе координат детектора при сканировании на ПАВИКОМ. На рисунке схематически представлена вся конструкция детектора целиком с эмульсионными слоями, зажатые сверху и снизу двумя металлическими пластинами.

В offline режиме использовался программный пакет FEDRA (Framework for Emulsion Data Reconstruction and Analysis) [120] для восстановления треков, пересекающих все эмульсионные пластинки, входящие в состав детектора.

Для привязки эмульсионных слоёв и определения координат треков была принята система координат (X_D , Y_D , Z_D), привязанная к детектору, схематично представлено на рис. 4.33: оси X_D и Z_D лежат в горизонтальной плоскости, а ось Y_D направлена вертикально вверх. Каждый реконструированный трек, пересекающий всю стопку эмульсионных пластин содержит следующую информацию: (X_D , Y_D , Z_D) -координаты трека, углы трека задаются θ_D , φ_D или определяются в переменных $tx = tg(\theta_D)\cos(\varphi_D)$, $ty = tg(\theta_D)\sin(\varphi_D)$, 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 всех детекторов в единой системе координат была выбрана система, привязанная к поверхности земли (X_3, Y_3, Z_3) (красные оси на рис. 4.34 а), 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 $\varphi_3 = 0 \div 180^\circ$ соответствует направлению «назад», а $\varphi_3 = 180 \div 360^\circ$ - направлению «вперёд».

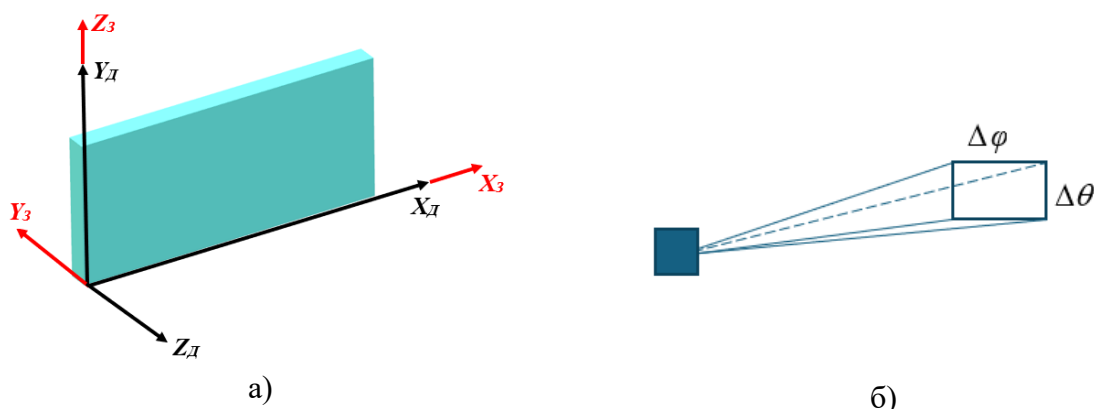


Рисунок 4.34 а) взаимное расположение систем координат, связанных с детектором и с поверхностью земли; б) элементы телесного угла $\Delta\varphi, \Delta\theta$ единичного объема.

Результатами измерений являются угловые распределения количества мюонов в детекторе. Верхняя полусфера вокруг оси Y_D делится на элементы телесного угла, соответствующие интервалам $(\Delta\varphi, \Delta\theta)$ - бины, см. рис. 4.34 б), и для каждого бина производится подсчёт числа зарегистрированных мюонов.

В качестве представления экспериментальных результатов в данном эксперименте выбраны двумерные угловые распределения в виде линий уровня, которые более чувствительны к изменениям числа мюонов в соседних угловых ячейках. На рис. 4.35 приведены одни и те же экспериментальные результаты в виде трехмерного распределения числа мюонов по углам φ, θ и те же экспериментальные данные в виде линий уровня для одного из детекторов (детектор 6 на схеме рис. 4.28 в) .

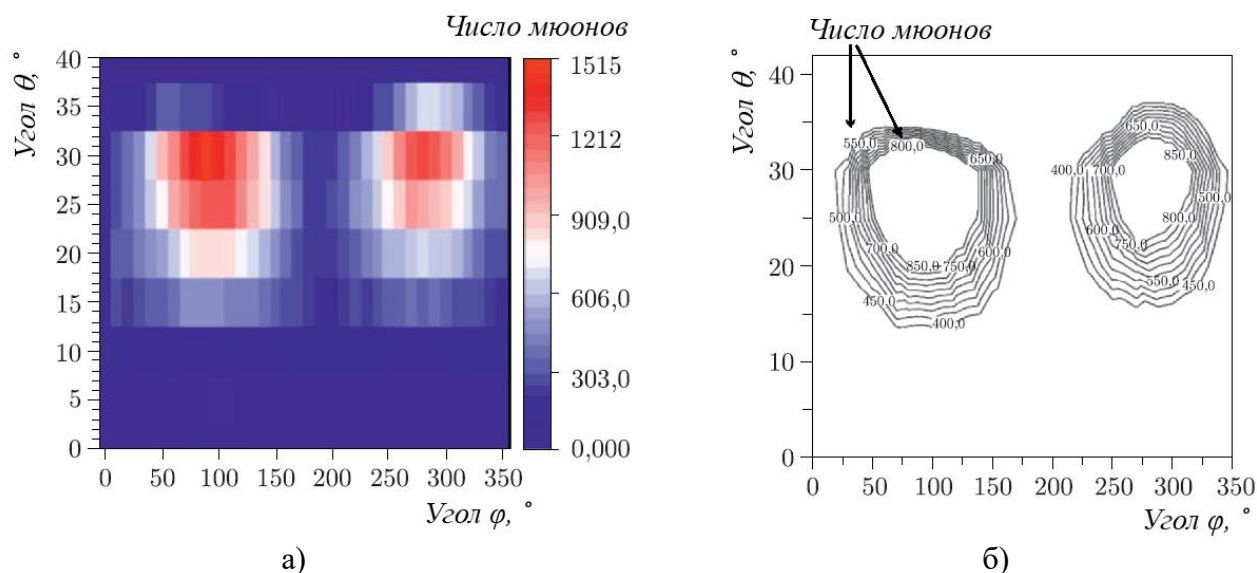


Рисунок 4.35 Распределение числа мюонов по углам φ и θ : а) – в виде трехмерной гистограммы, б) – в виде линий уровня.

Распределения числа мюонов по углам φ и θ получены для детектора 6 с бинами $\Delta\theta = 5^\circ$ и $\Delta\varphi = 10^\circ$ в системе координат детектора. Пик в правой части гистограммы на рис. 4.35 а соответствует мюонам, приходящим в переднем секторе наблюдения ($180^\circ < \varphi \leq 360^\circ$), а пик в левой части гистограммы - мюонам, летящим сзади ($0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$). Более наглядным является представление данных в виде линий уровня, см. рис. 4.35 б, 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 $N_1 < N \leq N_2$.

Экспериментальные результаты в виде линий уровня для мюонов, приходящих в переднем секторе наблюдения ($180^\circ < \varphi \leq 360^\circ$) детектора 6 представлены на рис. 4.36 в увеличенном виде. Особенности хода линий уровня, представленные на увеличенной части гистограммы рис. 4.36, иллюстрируют чувствительность метода и отражают структурные особенности видимой части исследуемого объекта, отмечено на рисунке цифрами 1 и 2 (вход в подвальные

помещения ЦПБМ и окно в подвальном помещении, зарегистрированные детектором 6, находившемся в подвале на глубине 3 метра).

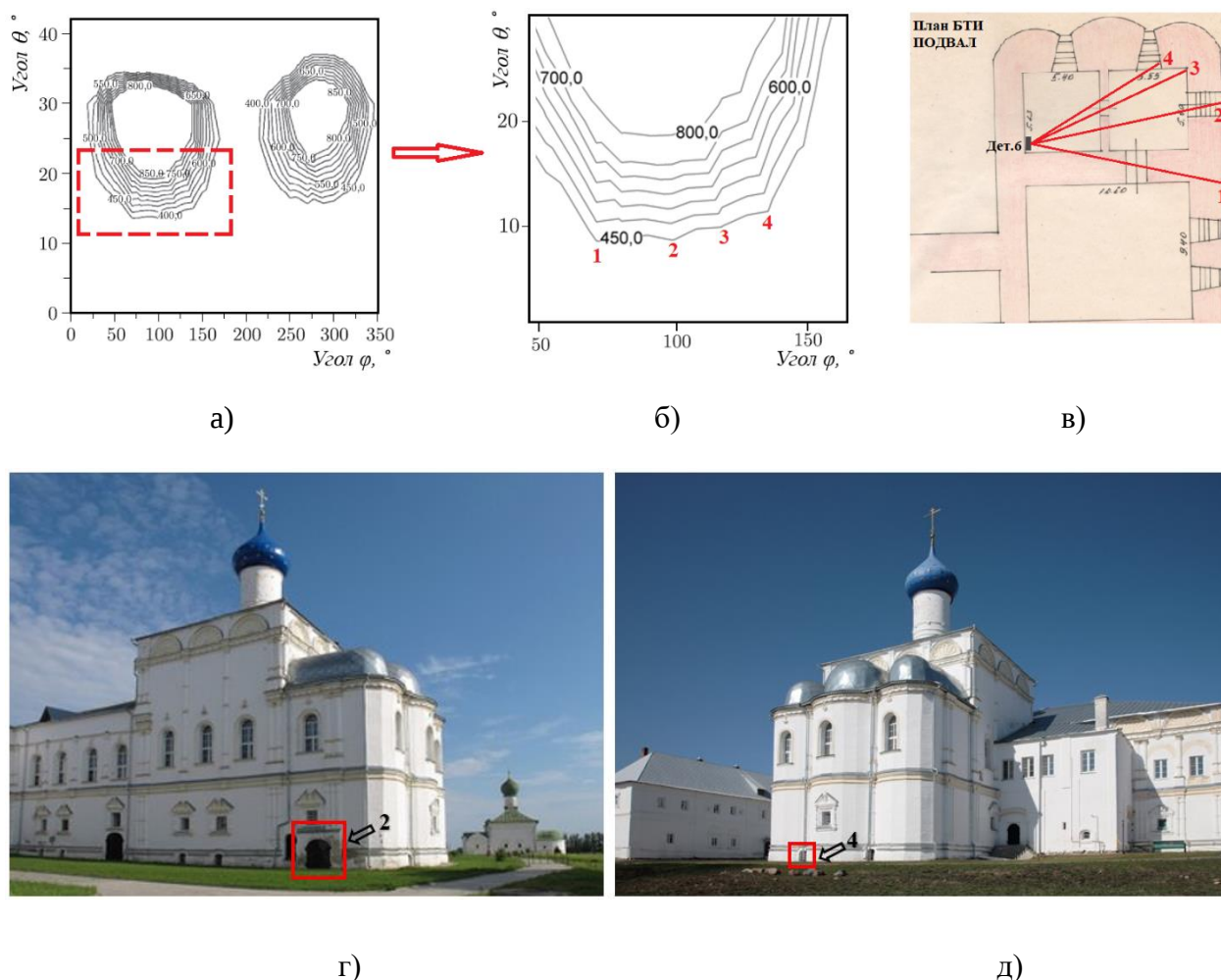


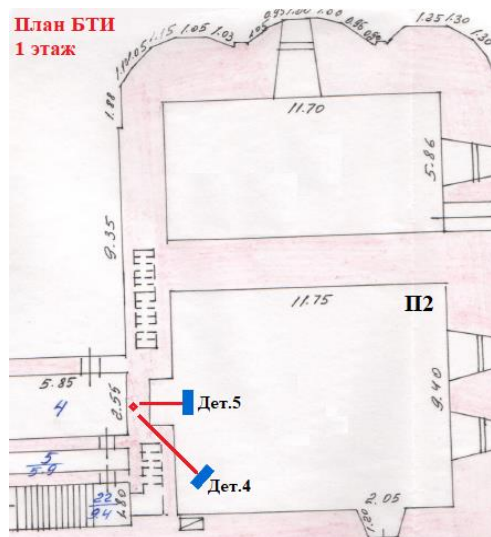
Рисунок 4.36 а) распределение числа мюонов по углам φ и θ в виде линий уровня по направлению «вперёд» $180^\circ < \varphi \leq 360^\circ$ и «назад» ($0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$); б) увеличенная часть распределения линий уровня, для детектора 6 в направлении «назад»; видимым объектам, таким как дверной и оконный проём, соответствуют небольшие пики на линиях уровня, отмечены цифрами 2 и 4; в) соответствие оконных и дверных проёмов особенностям 1-4 в распределении 4.37 б; г, д) фото зарегистрированных видимых объектов, отмеченных на гистограмме цифрами 2 и 4.

Данные, представленные на рисунке 4.36, отражают оригинальную идеологию одного из первых этапов анализа данных мюнографического эксперимента - проверку достоверности получаемых результатов [стр.201, 10, 11]. Данная проверка проводилась путем распознавания визуально проверяемых элементов конкретного объекта исследования, для детектора №6: 1- переход из маленького подвального помещения в большое, 2 – вход в подвальное

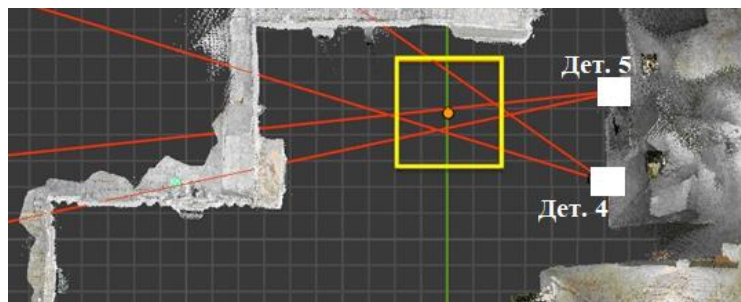
помещение, 3 – переход между маленькими подвальными помещениями, 4 – окно в маленьком подвальном помещении.

Экспериментальные результаты, достоверность которых была подтверждена описанным методом для видимых архитектурных элементов, дают основание использовать авторскую методику для 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).

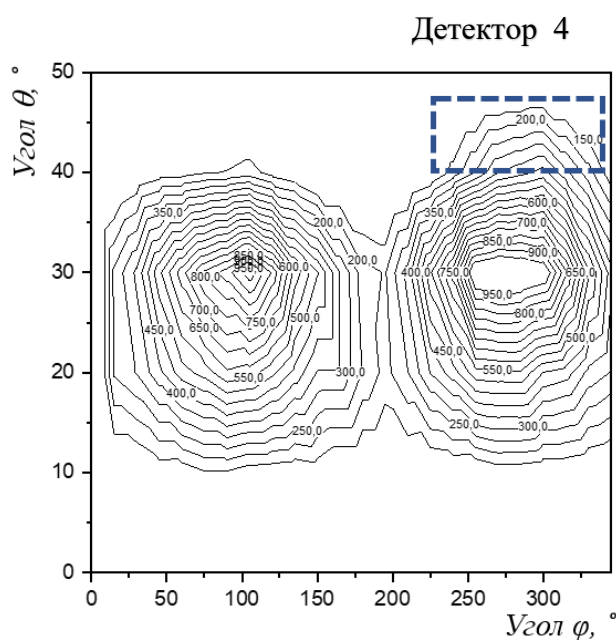
Одна из таких областей была обнаружена на пересечении лучей детекторов 4 и 5 внутри скрытого подвала ЦПБМ (рис. 4.37). Линии уровня для детекторов 4 и 5 показаны на рис. 4.37. Фрагменты линий уровня, выделенные на графиках прямоугольниками (направление «вперёд», $180^\circ < \varphi \leq 360^\circ$), имеют сложную форму: выпуклости на них выглядят не просто как пик, как это было в случае оконных и дверных проёмов, а занимают более протяжённую область. Кроме того, сами эти выпуклости содержат неоднородности, в том числе небольшие пики. Всё это свидетельствует о сложной конфигурации архитектурных элементов в этом направлении, включая, например, дверные проёмы. Следует отметить, что линии уровня в направлении «назад» ($0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$) на диаграммах детекторов 4 и 5 также демонстрируют сложную конфигурацию, что означает запутанную структуру помещений в этом направлении, включающую дверные и оконные проёмы, перепады толщины стен и т.п.



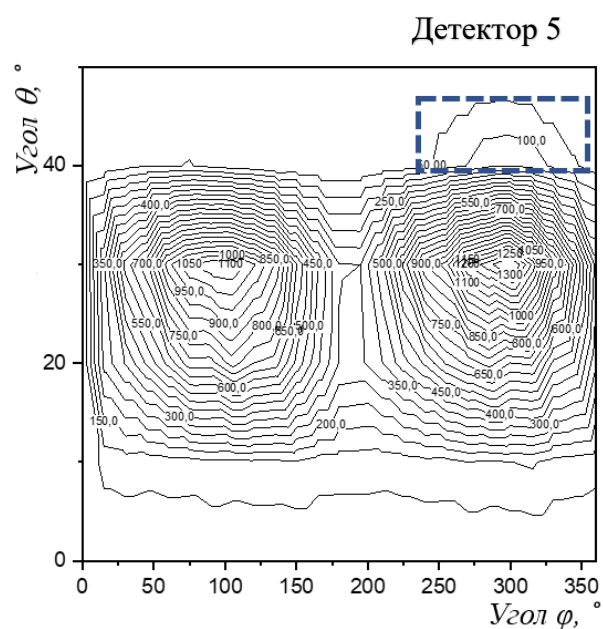
а)



б)



в)

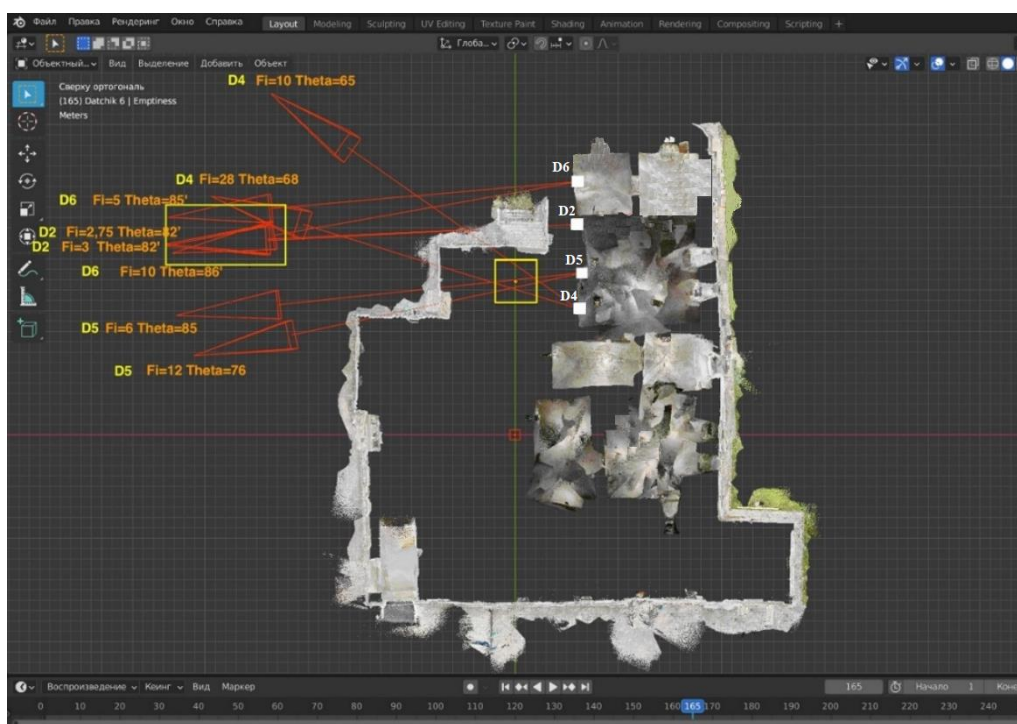


г)

Рисунок 4.37 а) план БТИ первого этажа ЦПБМ над комнатой подвального помещения, где установлены детекторы 4 и 5; б) лидарная съемка видимых границ помещения в местах экспозиции детекторов, красными лучами схематично обозначено пересечение лучей детекторов 4 и 5 внутри недоступной области подвалов ЦПБМ, область пересечения выделена жёлтым квадратом; в) экспериментальные распределения в виде линий уровня для детектора 4; г) экспериментальные распределения в виде линий уровня для детектора 5.

Шаг линий уровня по зенитному углу θ на рис. 4.37 составляет 20 частиц. В направлении «вперёд» ($180^\circ < \varphi \leq 360^\circ$) легко видеть выступы при достаточно больших значениях угла $\theta > 40^\circ$, которые отвечают объекту или объектам на первом этаже - некой скрытой вертикальной полости.

Для большей наглядности обнаруженные особенности скрытых подземных помещений перенесены в 3D-модель лидарной съемки. Так, на рисунке 4.38 а) представлен ряд зарегистрированных особенностей в зоне пересечения лучей детекторов 2, 4, 5 и 6, находящихся под землёй между зданиями ЦПБМ и ЦВС. Области пересечения лучей детекторов в направлениях, соответствующих выступам на линиях уровня (соответствующие им углы θ , φ нанесены на рисунок), находятся под землёй и свидетельствуют о присутствии объекта с меньшей плотностью материала. Так, обнаруженная детекторами 2, 6 область ($2^\circ < \varphi < 10^\circ$, $82^\circ < \theta < 86^\circ$) - возможно, является древним захоронением (склепом), либо скрытой частью воздуховода. Ещё одна полость зарегистрирована детекторами 4, 5 область ($6^\circ < \varphi < 28^\circ$, $65^\circ < \theta < 85^\circ$) и находится внутри здания ЦПБМ в скрытых подвальных помещениях. Обе найденные полости отмечены на рисунке 4.38 а) желтыми прямоугольниками.



а)

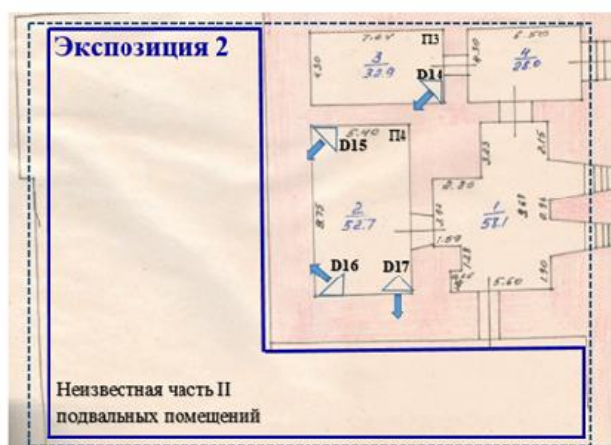


б)

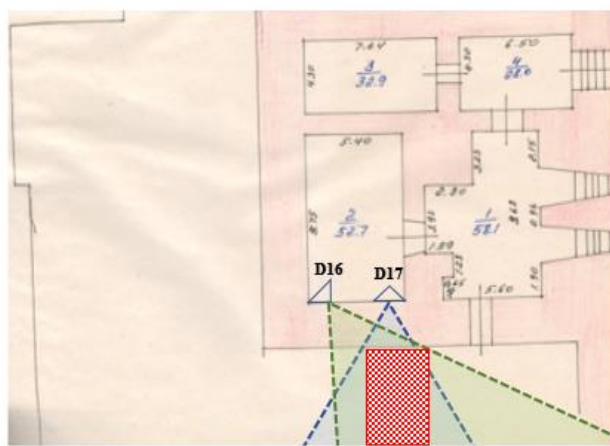
Рисунок 4.38 а) лидарная съемка видимых границ помещения в местах экспозиции детекторов, красными лучами схематично обозначено пересечение лучей детекторов 2, 4, 5 и 6 внутри недоступной области подвалов ЦПБМ, область пересечения выделена жёлтыми прямоугольниками; б) та же область на объёмном изображении с привязкой к местности (области обнаруженных аномалий обозначены красными прямоугольниками).

Точность определения центра полости, обнаруженной детекторами 2 и 6 (в подвале ЦПБМ) составляет ± 1 метр, а для полости, обнаруженной детекторами 4 и 5, находящейся под землей между зданиями ЦПБМ, ЦВС и Троицким собором составляет $\pm 2,5$ метра, см. рис. 4.38 б).

На рисунках 4.39 – 4.40 представлены результаты обработки детекторов второй экспозиции в здании ЦПБМ. На рисунке 4.39 а) представлена часть плана БТИ подвальных помещений, где были установлены детекторы второй экспозиции для исследования неизвестных областей подвальных помещений. На рис. 4.39 б) схематично представлено положение детекторов 16 и 17, а также пересекающиеся углы обзора этих детекторов.



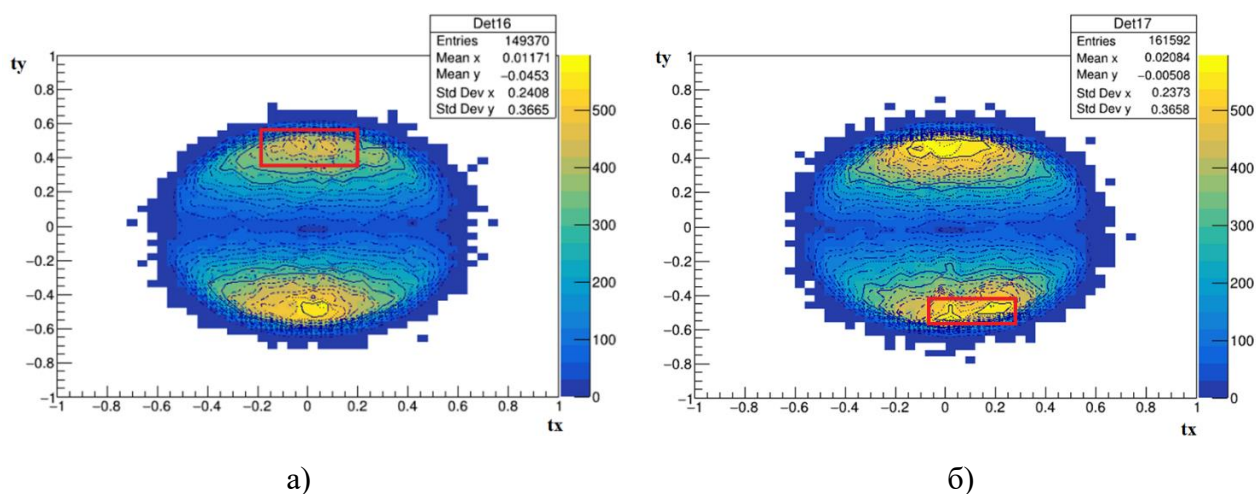
а)



б)

Рисунок 4.39 а) схема установки четырех детекторов второй экспозиции в подвальных помещениях ЦПБМ на плане БТИ, синими стрелками обозначено направление зоны видимости детекторов «вперёд»; б) схематичное изображение полости (заштрихованный прямоугольник), обнаруженной по экспериментальным распределениям в области пересечения секторов обзора детекторов 16 и 17.

Результаты обработки детекторов 16 и 17 представлены в переменных tx и ty (тангенсы углов наклона треков в проекциях на плоскости xz , yz) в координатах детектора, см. рис. 4.40.



а)

б)

Рисунок 4.40 Цветные трехмерные гистограммы по данным детекторов 16 (а) и 17 (б), экспериментальные результаты представлены в системах отсчета детекторов.

Структурные особенности в области пересечения секторов обзора детекторов 16 и 17 находятся в верхней полусфере для детектора 16, рис. 4.40 а ($0 < ty < 1$ - зона видимости детектора 16 «назад»), и соответственно, в нижней полусфере для детектора 17, рис. 4.40 б ($-1 < ty < 0$ - зона видимости детектора 17 «вперёд»). Из представленных экспериментальных распределений рис. 4.40 видно, что детекторы 16 и 17 регистрируют одни и те же структурные

особенности в неизвестной части подвала ЦПБМ (с учетом того, что детектор 16 располагался под углом 45° к стене). Так, данные детектора 17 демонстрируют максимумы в направлении $tx_{D17} = [0,0; 0,5]$, $ty_{D17} = [-0,6; -0,4]$. Таким образом, большой диапазон углов $\theta \approx 10^\circ \div 30^\circ$ вблизи $tx=0$ указывает на то, что найденная неоднородность с пониженной плотностью находится точно напротив места установки детектора 17, а направление $tx=0,25$ указывает на положение на 20° правее положения детектора. Данная неоднородность схематично представлена в виде заштрихованного прямоугольника на рис. 4.39 б. Сходные особенности в угловых распределениях наблюдаются и в детекторе 16 в диапазоне $tx_{D16} = [-0,1; 0,1]$, $-ty_{D16} = [-0,55; -0,25]$, с некоторым смещением относительно детектора 17 из-за расположения под углом 45° .

На экспериментальных распределениях, полученных для детекторов 14 и 15 по направлению «вперёд» (соответствующей неизвестной части исследуемых подвальных помещений), не выявлено никаких выраженных изменений плотности зарегистрированного потока мюонов, данные лишь отражают сложную конфигурацию известных объектов, расположенных в подвале ЦПБМ.

Третья экспозиция детекторов проводилась в подвальных помещениях здания Церкви Всех Святых. Общая схема всех установленных во время данной экспозиции детекторов представлена на рис. 4.27 б. Детекторы 13 и 18 были установлены в подвальном помещении ЦВС последовательно во времени, но с одним и тем же временем экспозиции $\sim 2,5$ месяцев. Оба детектора располагались приблизительно в одном и том же месте, схема их расположения представлена на рис. 4.41. Так как оба детектора использовались для наблюдения в одном и том же направлении в идентичных условиях, то зарегистрированные ими особенности свидетельствуют о реальном присутствии скрытых структур в этом направлении.

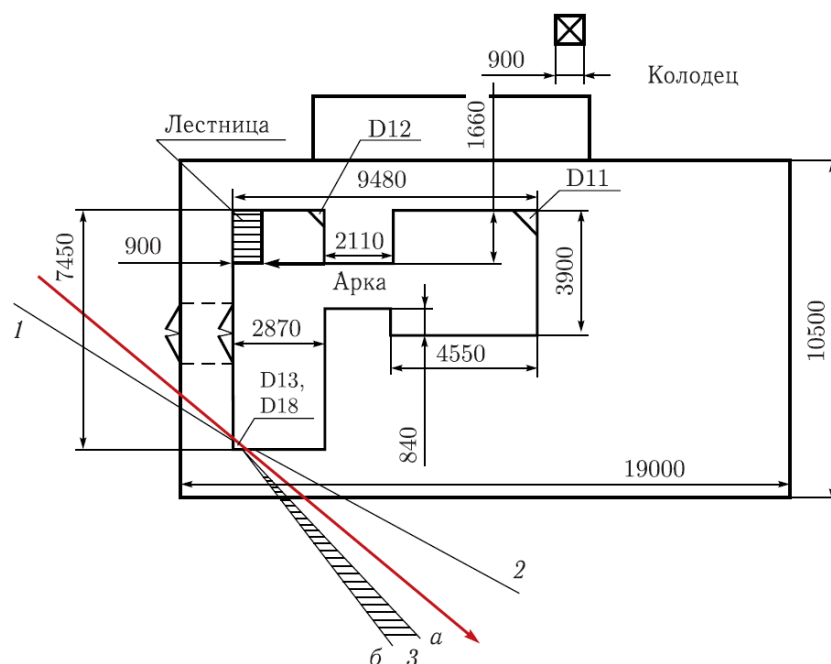


Рисунок 4.41 Схема расположения детекторов 11, 12, 13 и 18 в подвальном помещении ЦВС. Прямые 1, 2 и 3 указывают в направлении обнаруженных особенностей потоков мюонов.

Экспериментальные распределения числа мюонов в детекторах 13 и 18 в переменных tx , ty в системе координат детектора представлены на рис. 4.42.

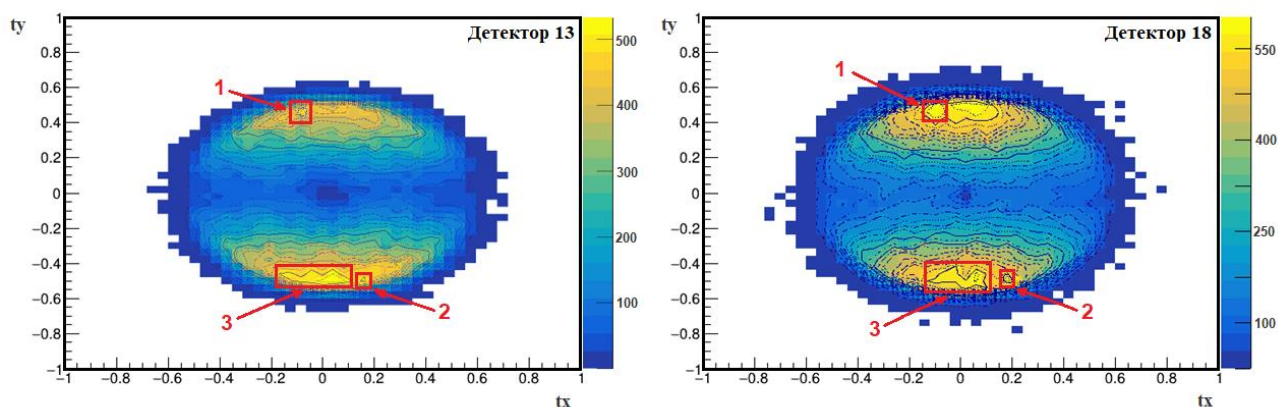


Рисунок 4.42 Экспериментальное угловое распределение мюонов в детекторах 13 и 18, экспонированных в здании ЦВС. Цветовая шкала на гистограмме обозначает число зарегистрированных мюонов в одном бине. Значения переменных по оси ординат $ty > 0$ соответствуют направлению «назад» (верхняя полусфера), а $ty < 0$ - направлению «вперёд».

Основная часть широких пиков в области $tx = 0$, $ty = \pm 0,5$ соответствует естественному распределению потоков мюонов в данном диапазоне углов ($\theta < 45^\circ$). Однако на этом фоне присутствуют дополнительные локальные максимумы (обозначенные цифрами 1, 2 и 3 на рис. 4.42), где

- 1 - неоднородность в направлении «назад» при $t_x = -0,1$; $t_y = 0,45$;
- 2 - неоднородность в направлении «вперед» при $t_x = 0,18$; $t_y = -0,5$;
- 3 - широкая неоднородность в направлении «вперед» при $t_x = (-0,2; 0,1)$; $t_y = -0,5$.

Наличие этих неоднородностей в распределениях указывает на то, что в соответствующих направлениях присутствуют области с меньшей поглощающей способностью. Учитывая, что значения переменной $t_y = \pm 0,5$ соответствуют углу к горизонту порядка $20 \div 25^\circ$, эти особенности находятся на расстоянии не более $7 \div 8$ метров от положения детектора.

Рассмотрим каждую из обнаруженных особенностей в отдельности. Максимум под номером 1 в направлении «назад» может соответствовать объекту небольшого размера - полости или области с плотностью, меньшей по сравнению с основной частью материала.

Максимум под номером 2 в направлении «вперёд» с большой долей вероятности соответствует дверному проему, ведущему в камеру между подвалом и первым этажом.

Области вблизи направления $t_x = 0$ соответствуют естественному максимуму потока мюонов при фиксированном значении t_y и в первом приближении должны быть одинаковы в направлениях «вперед» и «назад». Однако в направлении «вперед» при $t_y = -0,5$ видна протяжённая неоднородность, обозначенная цифрой 3, намного превышающая естественный фон. Её угловой размер указывает на крупную аномалию, масштаб которой, определяемый расстоянием до детектора, может быть оценён по величине сектора а-б на рис. 4.41.

Детекторы 18 и 19 были установлены вдоль одной из стен в подвальном помещении ЦВС, схема их расположения и пересечения секторов обзора показана на рис. 4.43.

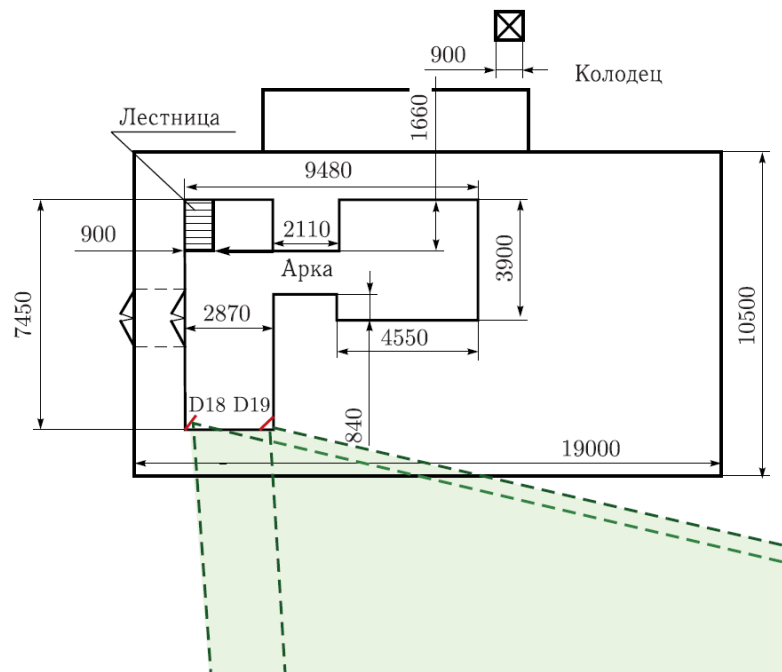


Рисунок 4.43 Схема расположения детекторов 18 и 19 в подвальном помещении ЦВС, зеленым цветом схематически показано пересечение секторов обзора этих детекторов.

Экспериментальные распределения числа мюонов в детекторах 18 и 19 в переменных tx , ty в системе координат детектора представлены на рис. 4.44.

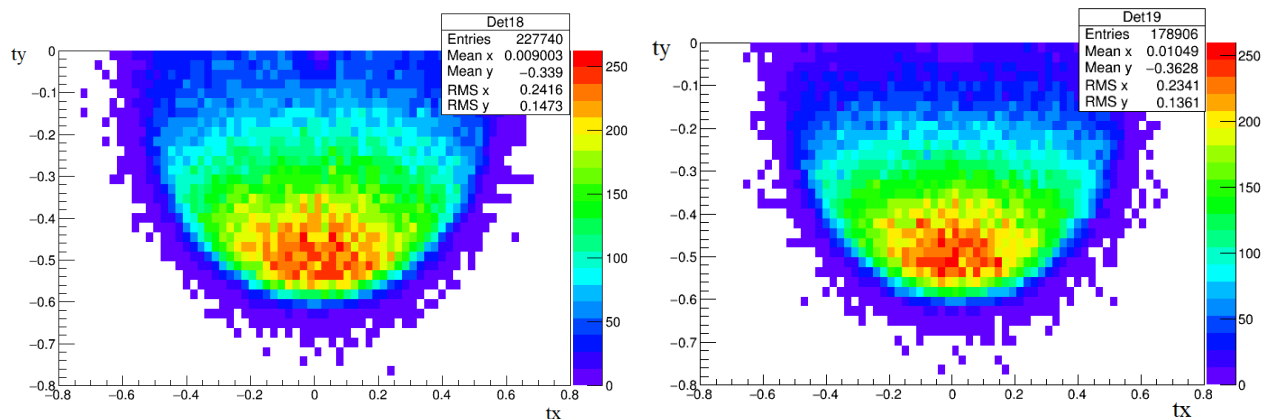


Рисунок 4.44 Экспериментальное угловое распределение мюонов в детекторах 18 и 19, экспонированных в здании ЦВС. Цветовая шкала на гистограмме обозначает число зарегистрированных мюонов в одном бине. Значения переменных по оси ординат $ty < 0$ соответствуют направлению «вперёд».

Оба детектора демонстрируют довольно протяженные области в диапазоне $tx_{D18} = [-0,25; 0,25]$, $ty_{D18} = [-0,55; -0,35]$ и $tx_{D19} = [-0,25; 0,25]$, $ty_{D19} = [-0,55; -0,35]$ с локальными максимумами, соответствующими ~ 250 мюонам в бине. Ввиду различного положения детекторов (детекторы 18 и 19 находились на расстоянии порядка трех метров относительно друг друга) экспериментальные результаты

нагляднее перевести в единую систему координат земли и рассматривать двумерные распределения по углу φ при фиксированных углах θ , см. рис. 4.46.

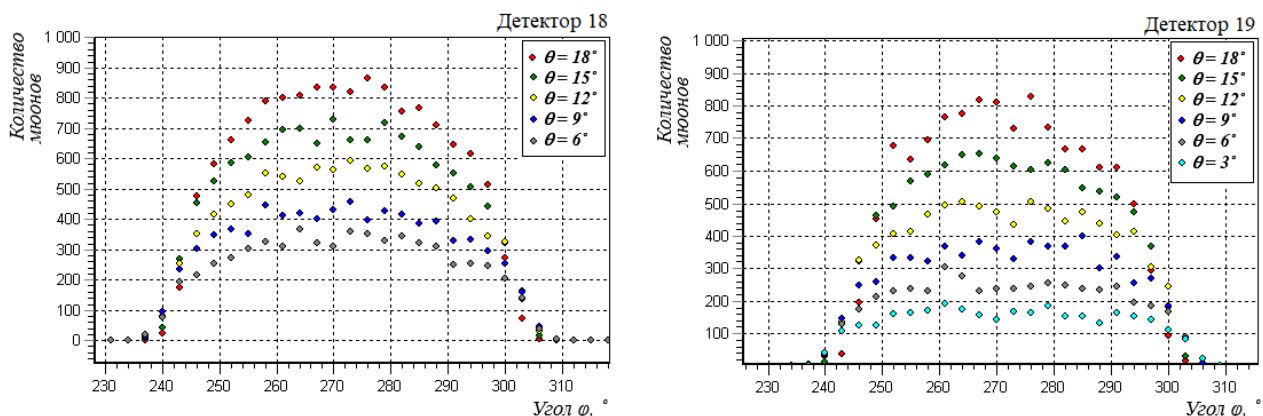


Рисунок 4.45 Зависимость числа частиц в бинах от угла φ при фиксированных углах θ к горизонту для детекторов 18 и 19.

Особенностью представленных на рис. 4.45 распределений является наличие чётких перегибов при значениях $\theta=12^\circ$ и $\theta=15^\circ$ в области углов $\varphi \sim 255 \div 260^\circ$ (до и после ход точек довольно гладкий), что говорит о пересечении потоком мюонов протяжённого объекта, имеющего локальную неоднородность, например стен, идущих под прямым углом друг к другу. Можно предположить, что указанные перегибы в распределении свидетельствуют о пересечении частицами протяжённого полого подземного объекта со стенами более плотными (камень), чем окружающее пространство (грунт).

Чтобы проверить это предположение, было проведено дополнительное моделирование облучения мюонами подземной камеры прямоугольной формы, горизонтальная и вертикальная проекции которой показаны на рис. 4.46.

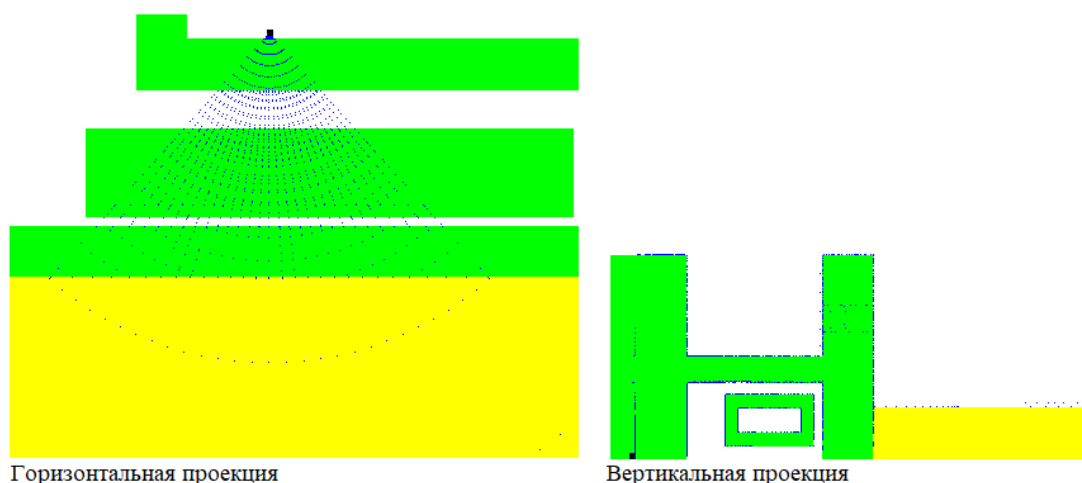


Рисунок 4.46 Горизонтальная и вертикальная проекции модели подземной камеры прямоугольной формы для расчёта отклика детектора.

Распределения числа частиц в бине при углах $\theta=3, 6, 9, 12, 15$ и 18° для такого объекта показаны на рис. 4.47. На распределении видны характерные перегибы в направлении $\theta > 6^\circ$ и $\varphi \sim 60 \div 75^\circ$. В модели они являются результатом пересечения лучами стен, идущих под прямым углом друг другу. Форма и положение этих особенностей зависят от взаимного положения детектора и камеры.

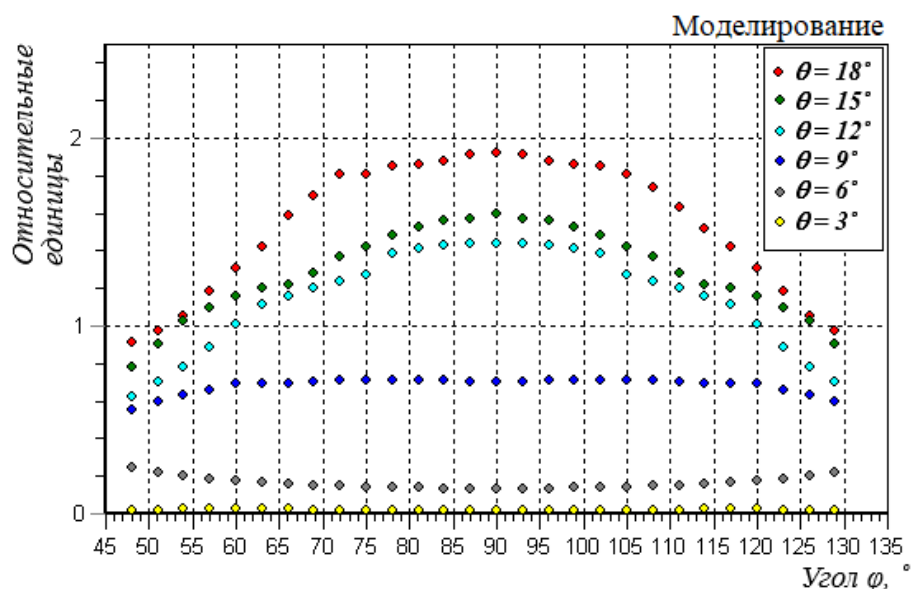


Рисунок 4.47 Зависимость числа частиц в бинах от угла φ при фиксированных углах θ к горизонту, полученная в результате модельных расчётов.

Сравнение особенностей на экспериментальных и смоделированных распределениях позволяет предположить, что в секторах обзора детекторов 18 и

19 находится протяжённый полый объект, на сигнал от которого накладываются «тени» от локальных неоднородностей.

На рис. 4.48 показан план части территории монастыря вокруг ЦВС. На план нанесены линии, соответствующие направлениям по углу $\varphi = 12^\circ$ и $\varphi = 15^\circ$, при которых наблюдаются изломы на распределениях мюонов, зарегистрированных детекторами 18 (красные линии) и 19 (синие линии).

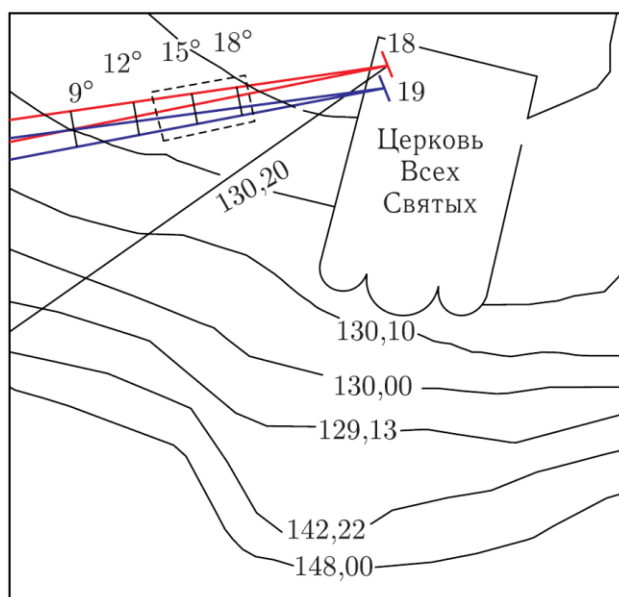


Рисунок 4.48 Часть территории монастыря с ЦВС с указанием уровня высот. Цветные линии – направления от детекторов 18 и 19 при $\varphi = 12$ и 15° , при которых наблюдаются изломы на распределениях мюонов.

То, что при других значениях угла φ особенности в распределениях не наблюдаются, означает, что частицы, падающие под этими углами, проходят выше или ниже возможного объекта. На рис. 4.48 отрезками отмечены места выхода мюонов из грунта, выходящих под разными углами θ из грунта на склоне. Места пересечения лучами объекта при этом находятся под землёй на глубине порядка $1 \div 1,5$ м. Следовательно, можно предположить, что объект располагается в области, отмеченной на рис. 4.48 пунктирным прямоугольником.

На фотографии территории монастыря, см. рис. 4.49, желтыми прямоугольниками обозначены местоположения полостей, зарегистрированных в данном эксперименте:

- область под номером 1 - объект небольшого размера - полость или область с плотностью, меньшей чем основная часть материала (грунт, стены);
- область под номером 2 - с большой долей вероятности соответствует дверному проему, ведущему в келью между подвалом и первым этажом ЦВС – показан на вставке справа вверху;
- область под номером 3 - широкая неоднородность, соответствующая полости на глубине порядка 1-1,5 м;
- область под номером 4 - большая полость, обнаруженная с точностью $\pm 2,5$ м (она же показана ранее на трехмерной модели рис. 4.38 б) зданий монастыря);
- область под номером 5 – подклеть в замурованном подвале;
- область под номером 6 – замурованный воздуховод в подвале.

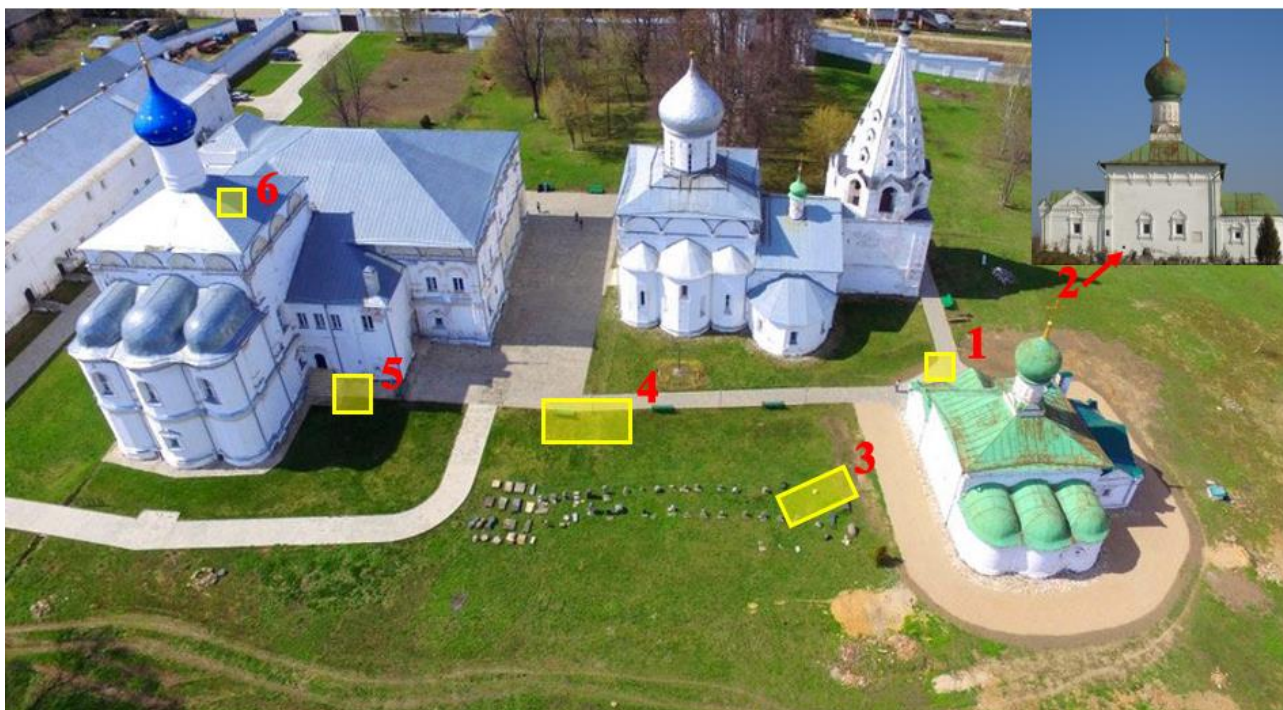


Рисунок 4.49 Фотография территории монастыря с указанием областей (жёлтые прямоугольники), где методом мюнографии обнаружены скрытые под землёй ранее неизвестные полости.

Проведенный методом мюнографии эксперимент по исследованию зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря в городе Переславль-Залесский с целью поиска скрытых фрагментов древних строений, пустот или уплотнений в стенах и под землей убедительно продемонстрировал успешность использования мюнографии для неинвазивного исследования объектов культурного наследия. В замурованной части подвалов ЦПБМ были обнаружены две пустые комнаты и значительное уплотнение (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 целый ряд неизвестных ранее полостей, происхождение и назначение которых может представлять большой интерес для дальнейших археологических и культурных изысканий. Проведенное исследование вызвало интерес не только наших коллег из российских институтов, но и зарубежных коллег, которые ссылаются на данное исследование в своих публикациях [121].

4.5 Пещерный храм Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, Печоры

В данном разделе представлены результаты эксперимента по изучению подземной части храмового комплекса Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, единственного никогда не закрывавшегося монастыря в России, объекта культурного наследия федерального значения. Главной достопримечательностью монастыря является пещерный храм («Богом зданные пещеры»), расположенный в подземных галереях природного происхождения, называемых «улицами». Исследования пещерного храма были выполнены в год 550 годовщины Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря и проводились методом мюнографии с полной гарантией целостности исторического памятника.

Целью эксперимента был поиск ранее неизвестных скрытых помещений и галерей в «Богом зданных пещерах». Используемые со времён основания

монастыря как подземный некрополь, семь известных пещерных галерей (улиц) имеют общую протяжённость более 200 м и находятся на глубине от 3 до 15 м под холмом, см. рис. 4.50 - 4.51.

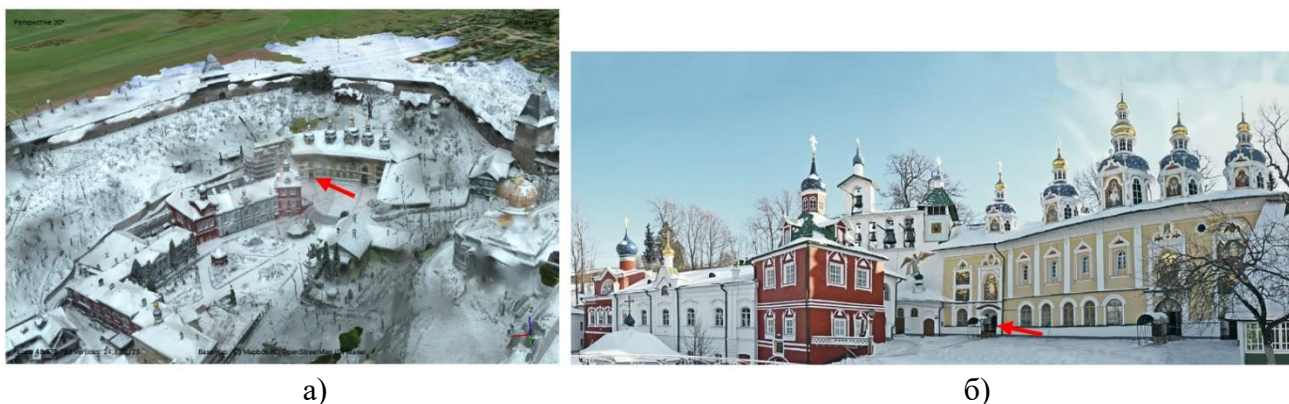


Рисунок 4.50 а) Фотограмметрическая съемка дроном территории Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря; б) фотография Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, стрелкой на обоих рисунках показан вход в пещерный храм.

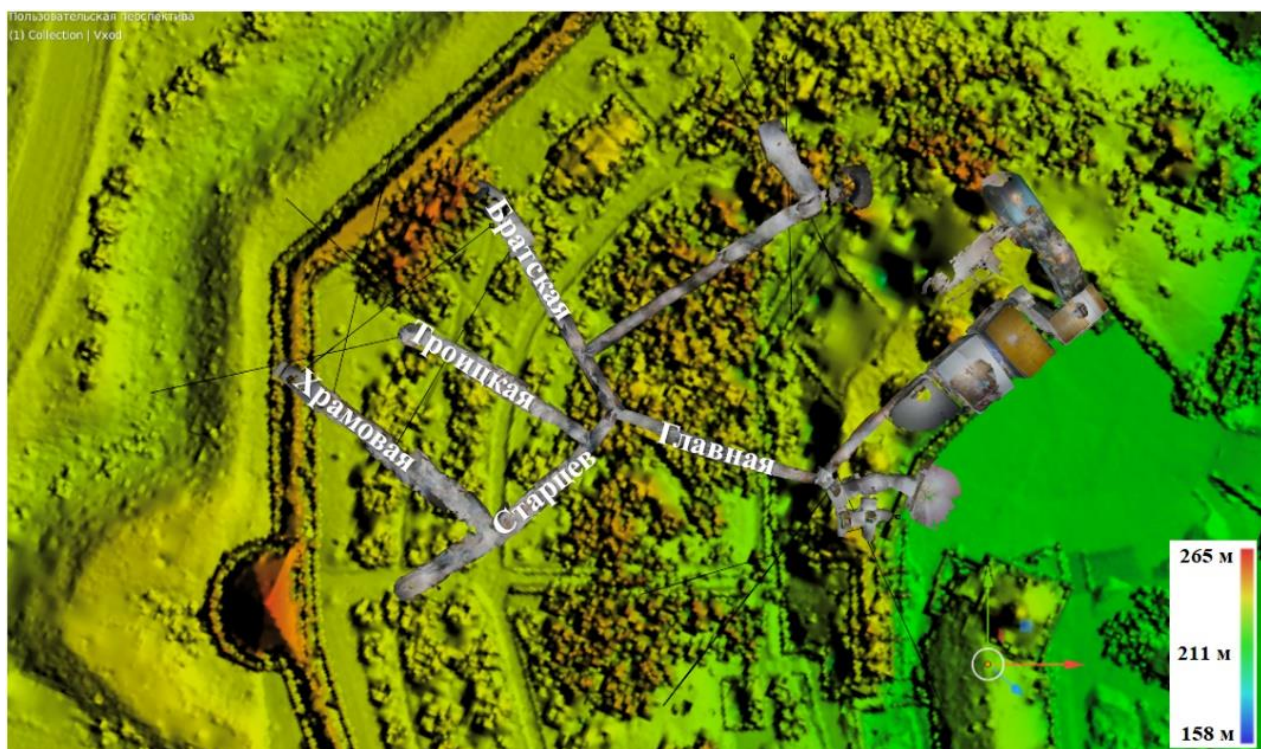


Рисунок 4.51 Расположение известных «улиц» «Богом зданных пещер» на совмещенном снимке ортофотоплана и лидарной съемки. Цветовая палитра соответствует измеренной высоте над уровнем моря.

Научные исследования этих пещер, которые могли бы подтвердить или опровергнуть версии об их происхождении, до последнего времени не проводились. При этом существует предположение, что под землёй могут находиться другие скрытые помещения помимо тех, к которым имеется доступ,

например, в виде продолжения уже известных галерей. В качестве первых объектов исследования были выбраны: склеп, находящийся за большой иконой на входе в пещеры (неизвестны его размеры и существует ли продолжение подземных коридоров за склепом) и область за тупиком Троицкой улицы с целью выяснения вопроса о возможном ее продолжении за имеющимся алтарем, обозначены I и II на схеме расположения детекторов в пещерах Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, см. рис.4.52.



Рисунок 4.52 Схема расположения детекторов в пещерах Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря. Треугольниками обозначено положение детекторов. Острые концы треугольников указывают направление обзора для исследования объектов. Два квадрата на рисунке, обозначенные цифрами I и II, показывают области исследуемых объектов.

Схема конструкции детектора, используемого в данном эксперименте представлена на рисунке 4.53.

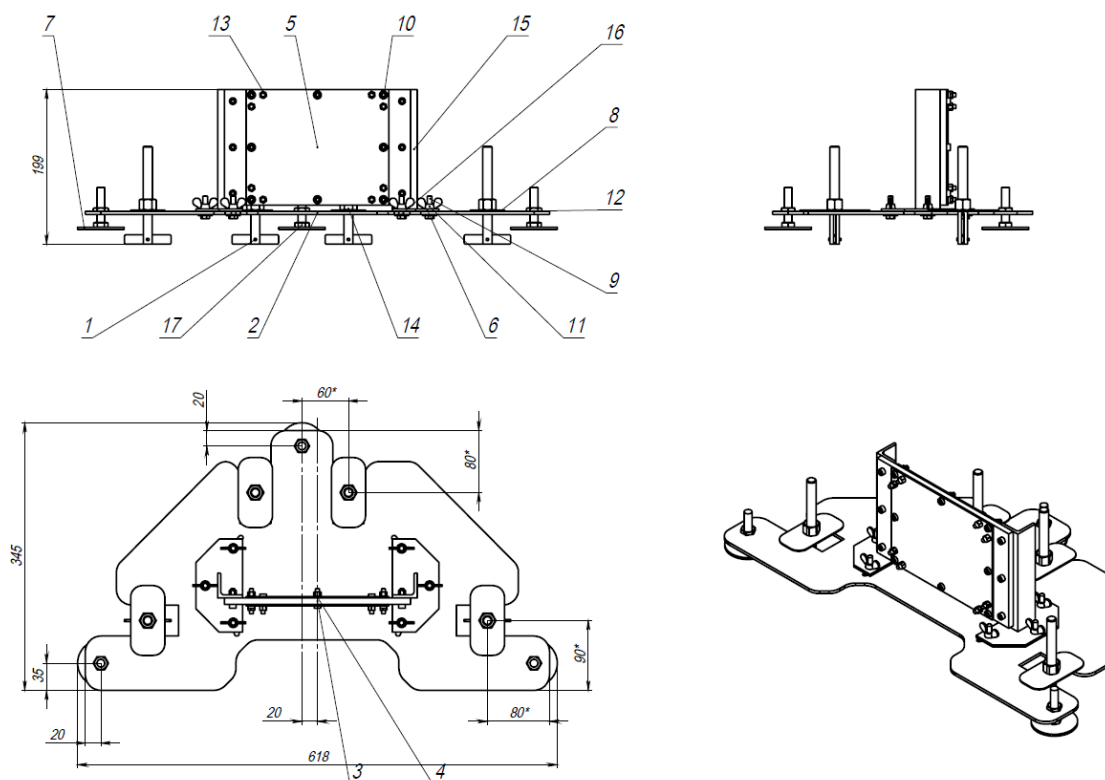


Рисунок 4.53 Сборочный чертёж конструкции детектора, размеры на рисунке приведены в миллиметрах. Цифрами 1÷17 на чертеже обозначены следующие сборочные единицы: 1- фиксирующая шпилька, 2- основание (сталь 4 мм), 3- фиксирующая пластина (алюминий 8 мм), 4-5 пластина (сталь 2 мм), 6- пластина ребра (сталь 3 мм), 7- шайба регулировки (сталь 3 мм), 8- шайба (сталь 1,5 мм), 9- болт М6, 10- винт М5, 11- гайка М6, 12- гайка М10, 13- гайка М5, 14- гайка М12, 15- уголок 4х32 (154 мм), 16- шайба А.6, 17- болт с шестигранной головкой и винт с потайной головкой и шестигранным углублением под ключ.

Всего в различных местах монастыря было установлено 13 эмульсионных детекторов. Из них два эмульсионных детектора были размещены на чердаке Успенской церкви для регистрации фонового потока мюонов, а остальные 11 – в подземных галереях. Каждый детектор представлял собой сборку из шести двухсторонних эмульсионных пластин размером 10,0 см×12,5 см, упакованных в многослойные свето- и водонепроницаемые пакеты с использованием вакуумной машины во избежание смещения слоя внутри пакета во время экспозиции. Эмульсия, используемая в данном эксперименте изготовлена российской компанией ООО “СЛАВИЧ”. Основные этапы сборки эмульсионного детектора представлены на рисунке 4.54.

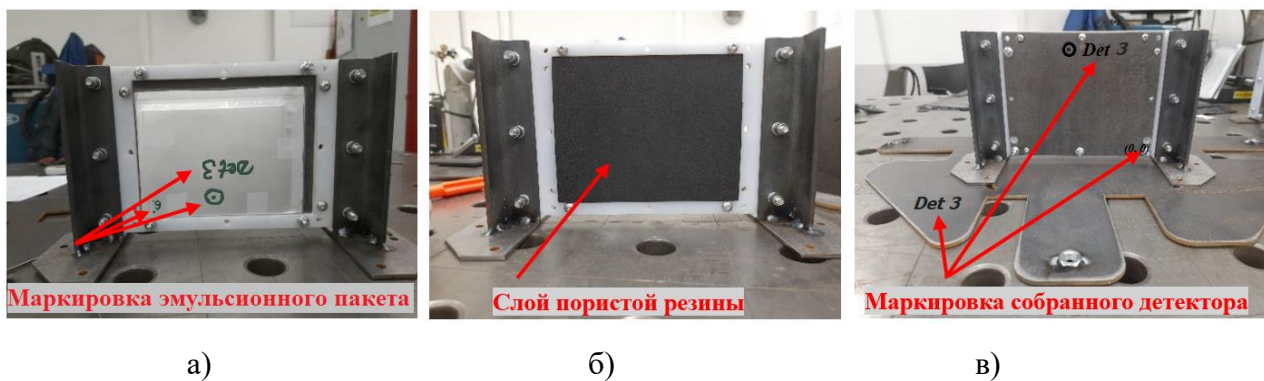


Рисунок 4.54 а) положение собранного эмульсионного пакета внутри детектора, б) защита эмульсионных пластин от механической деформации при упаковке детектора, в) внешний вид полностью собранного эмульсионного детектора.

На рисунке 4.55 представлены фотографии детекторов на местах экспозиции.



Рисунок 4.55 Фото детекторов на месте экспозиции: а) детектор 7 расположен на Братской улице и направлен на исследуемую зону II; б) детектор 11, расположен на Старцевом «переулке» пещер и направлен на исследуемую зону I (склеп); в) детектор 9 расположен в конце Троицкой улицы, направлен на исследуемую зону II; г) детектор 5, расположен на Братской улице, направлен на исследуемую зону II; д) детектор 4, расположен на Троицкой улице и просматривает Братскую улицу пещерного храма; е) детектор на чердаке для измерения фона.

Определение пространственного расположения установленных детекторов выполнялось с использованием современного геодезического оборудования, включая электронный тахеометр, лидарную и аэрофотосъемку. Это позволило определить положение детекторов с сантиметровой точностью в единой системе координат, см. рис. 4.56.

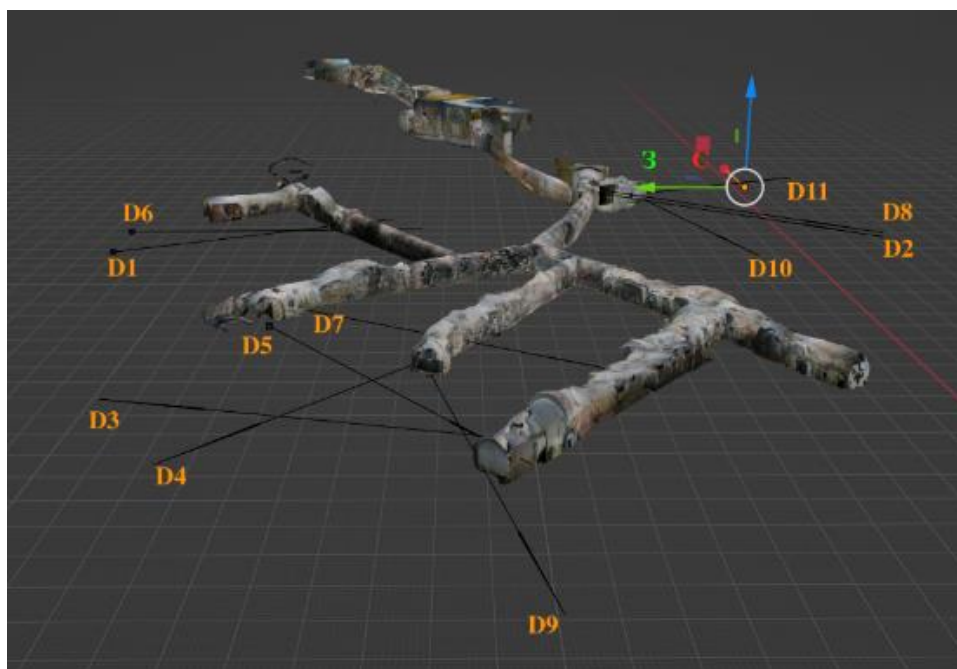


Рисунок 4.56 Лидарная съемка видимых границ «улиц» Богом зданных пещер в местах экспозиции детекторов.

Помимо общей схемы расположения детекторов (рис. 4.52), нанесенных на топографическую карту местности исследуемой территории Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, были построены аналогичные, более детальные схемы для каждого детектора в отдельности, что позволило наглядно оценить зону видимости каждого детектора на улицах пещер подземного монастыря. На рисунке 4.57 в качестве примера приведена схема двух детекторов 2 и 8, расположенных за иконой у входа в храм и ориентированных на область предполагаемого склепа, зона I исследования на рис. 4.52.

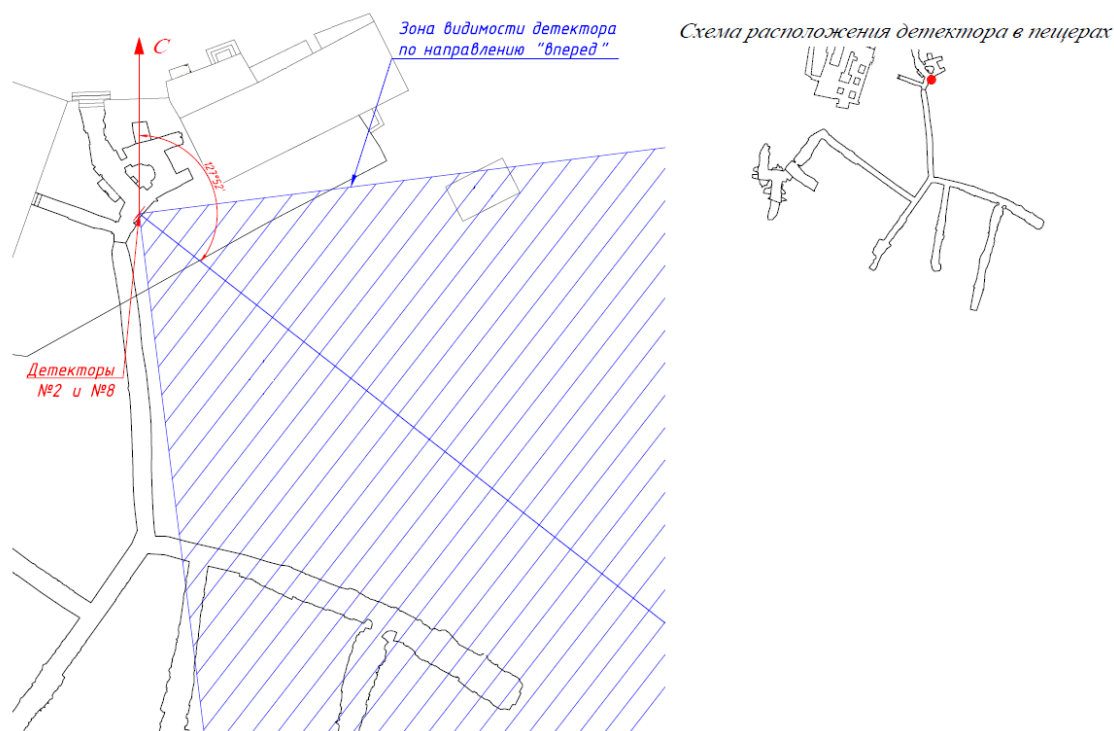


Рисунок 4.57 Схема расположения детекторов 2 и 8 в пещерах Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря с углом обзора по направлению «вперёд».

Во время любого мюонографического эксперимента необходимо, чтобы детекторы не перемещались в пространстве во время экспозиции. Так как Псково-Печерский монастырь – действующий, а на территории “пещер” проводятся службы, многочисленные экскурсии для паломников, во время экспозиции регулярно производились контрольные замеры положения детекторов, см. рис. 4.58.

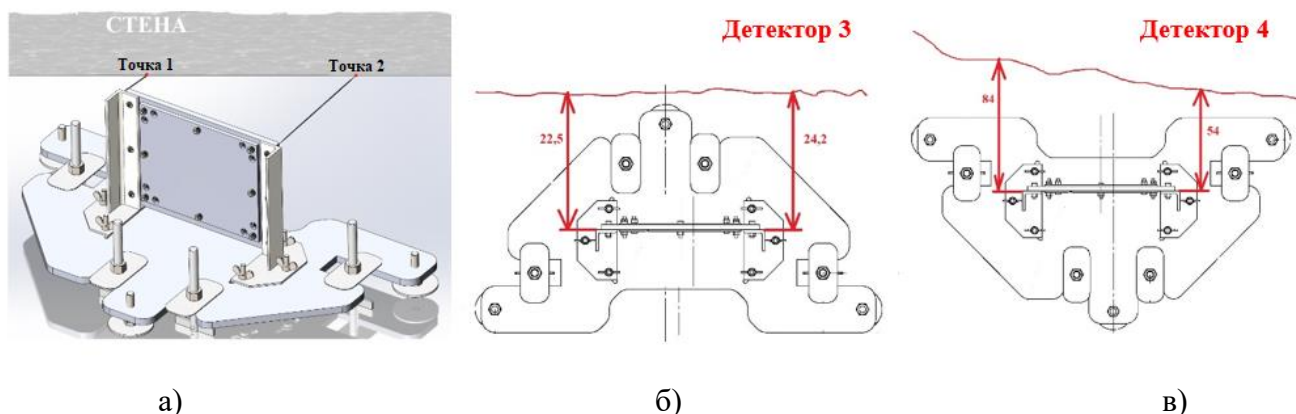


Рисунок 4.58 а) схематическое представление измерения контрольных точек; б, в) измерение контрольных точек для детектора 3, 4 соответственно (вид сверху).

Пещерный храм находится в холме из песчаника и имеет сложную структуру с различным наклоном улиц и большой протяженностью, поэтому время экспозиции детекторов оценивалось не только в соответствии с модельными расчетами, но и экспериментальными результатами о плотности треков зарегистрированных частиц, полученными с помощью контрольных слоёв ядерной эмульсии, помещённых на лицевой стороне некоторых детекторов, см. рис. 4.59.

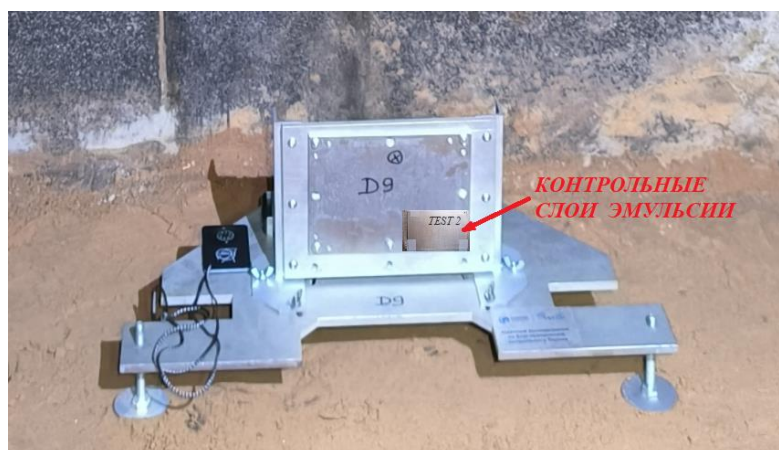


Рисунок 4.59 Фотография детектора 9 на месте экспозиции с контрольными слоями.

Отдельно упакованные контрольные слои (два слоя ядерной эмульсии размером 5 см×7 см) и зафиксированные снаружи на лицевой стороне некоторых детекторов использовались для оценки плотности накопленных треков. Спустя 1 и 2 месяца соответственно данные контрольные слои были демонтированы, проявлены и отсканированы, таким образом была произведена экспериментальная оценка загруженности фотоэмульсионных слоёв с учетом всех особенностей положения детекторов в подземных помещениях пещер и различной высотой сечения рельефа.

Время экспозиции основных 11 детекторов, размещенных в пещерах, составило 3,5 месяца, фоновых детекторов на чердаке – 2 месяца.

По окончании экспозиции фотоэмульсионные слои были проявлены на предприятии - изготовителе ООО “СЛАВИЧ” и отсканированы на микроскопах измерительного комплекса ПАВИКОМ. Также, как и в эксперименте в Свято-Троицком Даниловом монастыре, при первичной обработке треки

восстанавливались в системе координат детектора: реконструировались координаты (X_D , Y_D , Z_D), зенитный - θ_D и азимутальный углы - φ_D мюонного трека сначала в каждой эмульсионной пластине, потом во всем объеме детектора в диапазоне зенитных углов $\theta_D = \pm 45^\circ$. После сканирования всех 11 детекторов, находящихся на экспозиции в пещерах Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, все экспериментальные результаты были переведены в единую систему координат, связанную с поверхностью Земли, см. рис. 4.34.

Для нормировки экспериментальных данных «подземных» детекторов использовались результаты обработки данных фоновых детекторов, расположенных во время экспозиции на чердаке. В чердачном помещении Успенской церкви, где находится вход в пещеры, эмульсионные пластины одного из фоновых детекторов были расположены в горизонтальной плоскости (горизонтальный фоновый детектор), а другого, как и у остальных 11 детекторов, – в вертикальной плоскости (вертикальный фоновый детектор). Храмовый комплекс монастыря расположен в низине у подножья Святой горы таким образом, что купола Успенско-Покровского храма находятся немного ниже вершины холма (рис.4.50 а), поэтому уровень расположения фоновых детекторов, установленных на полу чердака Успенско-Покровского храма, находился ниже вершины холма примерно на 3÷4 м. Те атмосферные мюоны, путь которых частично проходил вне грунта, попадали на фоновые детекторы из области углов $\theta > 15 \div 20^\circ$, соответственно, горизонтальный детектор холм «не видел», см. рис. 4.60 а. В область видимости вертикального фонового детектора попадали стена монастыря (высотой 5 м и толщиной около 2 м), башня Тарарыгина (левый нижний угол на общей схеме расположения детекторов на рис. 4.52) и овраг глубиной до 8 м, в котором она расположена. В результате на угловых распределениях треков в вертикальном фоновом детекторе возникают неоднородности, см. рис. 4.60 б. Так, площадь красной области для мюонов, попавших в детектор спереди (верхняя часть рисунка 4.60 б), заметно меньше, чем площадь аналогичной области для мюонов, пришедших сзади (нижняя часть

рисунка 4.60 б). Это может означать, что в направлении «спереди» вертикального фонового детектора находилось какое-то препятствие. Для мюонов, пришедших спереди, красную область можно визуальнo разделить на основную часть и небольшой фрагмент слева. Провал между ними может свидетельствовать о наличии в этом направлении какого-то плотного объекта, например, башни.

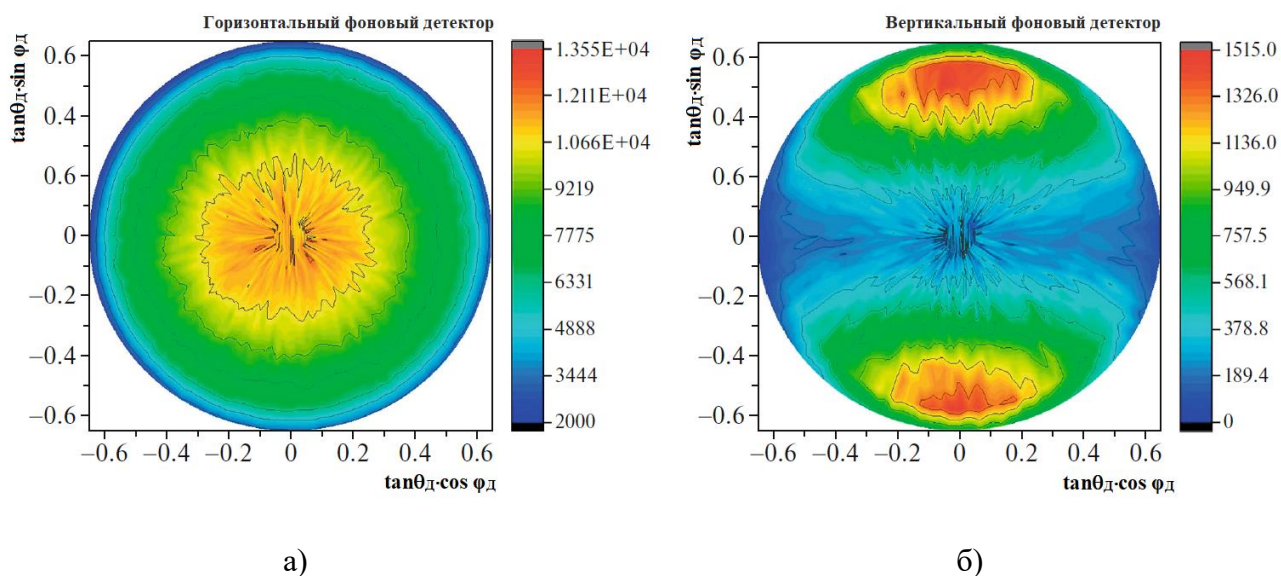


Рисунок 4.60 Результаты обработки данных фоновых детекторов, установленных на чердаке Успенско-Покровского храма. Распределения по углам θ и φ треков, зарегистрированных: а) горизонтальным детектором; б) вертикальным детектором. Цветовая шкала отражает поток мюонов в заданном диапазоне углов.

Результаты обработки детекторов, установленных на чердаке для регистрации фонового излучения, соответствует ожиданиям величины потока приходящих из атмосферы мюонов [122]. Эти измерения использовались для нормировки экспериментальных данных детекторов, находящихся в пещерном храме Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря.

В связи со спецификой используемого оборудования эффективность регистрации мюонов в слоях фотоэмульсии зависит от зенитного угла θ_d . Чтобы учесть эту эффективность, был введен поправочный коэффициент, полученный путём сравнения данных горизонтального фонового детектора с результатами расчётов по эмпирической формуле для мюонного потока:

$$\varphi = const \cdot \cos^n(\theta)$$

Значение коэффициента n варьируется от 1,72 до 2,15 в различных опубликованных данных [81,123]. В расчётах данного эксперимента значение $n=2$. При обработке результатов измерений подсчитывается число частиц в элементе телесного угла $d\Omega$:

$$d\Omega = \sin \theta d\varphi d\theta$$

Зависимость зарегистрированного детектором числа частиц в элементе телесного угла от величины угла θ_d , с учётом эмпирической формулы $d\Omega$, можно представить, как

$$\varphi_d = dN/d\theta = const \cdot \cos^2 \theta_d \cdot \sin \theta_d$$

где $const$ - поправочный коэффициент.

На рис. 4.61 представлены две кривые, одна из которых (чёрная) – это экспериментальное угловое распределение числа частиц в горизонтальном фоновом детекторе как функция угла θ (данные этого эксперимента). Другая (красная пунктирная) – это нормированный фон, полученный по формуле для φ_d .

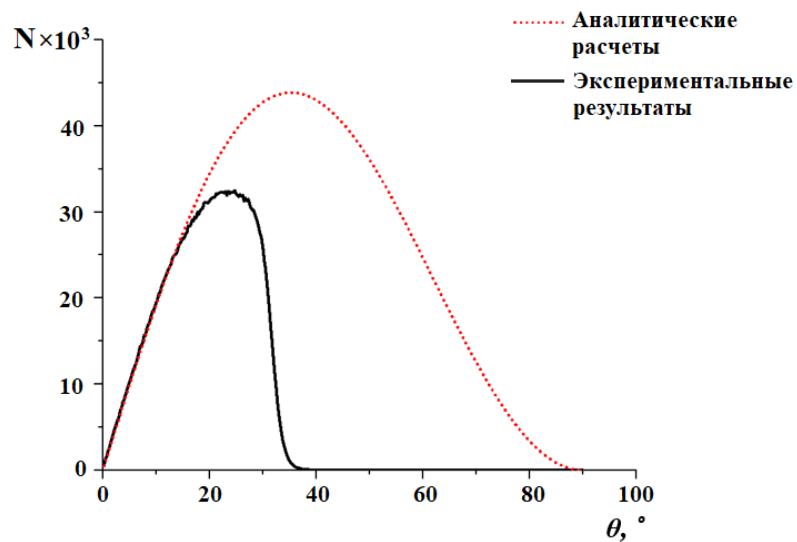


Рисунок 4.61 Сравнение результатов расчётов мюонного фона по формуле (красная пунктирная линия) с полученными экспериментальными данными горизонтального фонового детектора (чёрная линия).

Как показали результаты обработки экспериментальных данных горизонтального фонового детектора, (см. рис. 4.61), в области значений зенитного угла $\theta < 15^\circ$ экспериментальное распределение демонстрирует хорошее согласие с аналитической кривой, достигая при значении константы $const = 114000$ практически полного совпадения (левые ветви кривых на рис. 4.61). Таким образом, достоверными, не требующими поправки данными можно считать только данные в пределах телесного угла 15 градусов апертуры детектора ($\theta < 15^\circ$). Чтобы делать выводы об особенностях рельефа, строений и пустот на основе угловых распределений в более широком диапазоне углов, необходимо ввести поправку на зависимость эффективности детекторов от угла θ_d .

Поправочный коэффициент определялся как отношение величины потока, рассчитанной по аналитической формуле с известным значением константы $const$, к экспериментальной величине потока по данным горизонтального детектора для того же зенитного угла. Зависимость определённого таким образом поправочного коэффициента от зенитного угла в системе детектора показана на рис. 4.62.

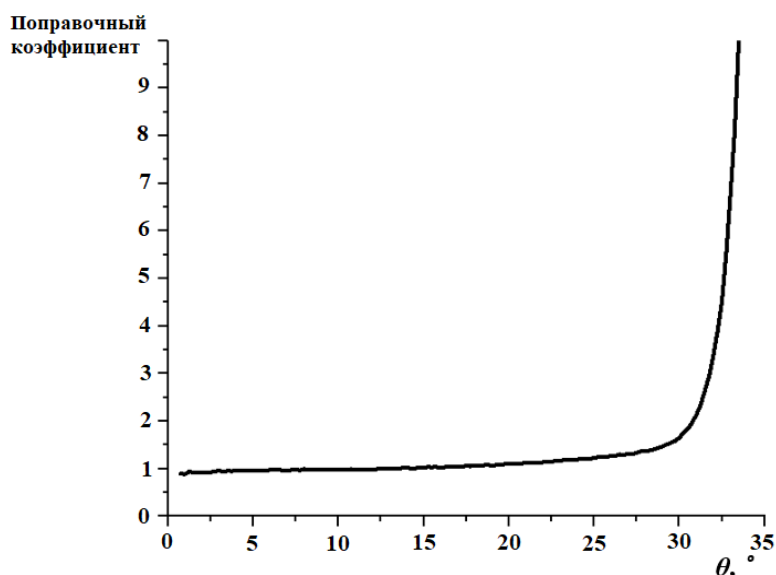


Рисунок 4.62 Поправочный коэффициент для учёта эффективности детектора в зависимости от зенитного угла трека.

На этот коэффициент умножается количество мюонов, зарегистрированных в различных интервалах зенитного угла. В качестве

примера можно рассмотреть трек, пришедший под углом $\theta_D = 29^\circ$ относительно нормали к поверхности детектора. С учётом поправки на эффективность получаем, что через детектор прошёл не 1 мюон, а 1.46 мюона. В результате при обработке данных для вертикального детектора будет учтено не 100, а 146 мюонов. Принимая во внимание вид зависимости поправочного коэффициента от зенитного угла (рис. 4.62), с учётом статистики, набираемой вертикальными детекторами, оптимальным для получения достоверных данных является угол $\theta_D < 30^\circ$ в системе координат детектора. Поправка вводилась при обработке данных вертикальных детекторов для углов, превышающих $\theta_D = 15^\circ$.

Моделирование проводилось для всех тринадцати детекторов с учётом их расположения на исследуемой территории Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря. В качестве примера приведен результат моделирования для детектора №2, установленного за иконой на входе в пещерный храм, была построена модель склона холма с учётом карты высот и рельефа местности, см. рисунок 4.63.

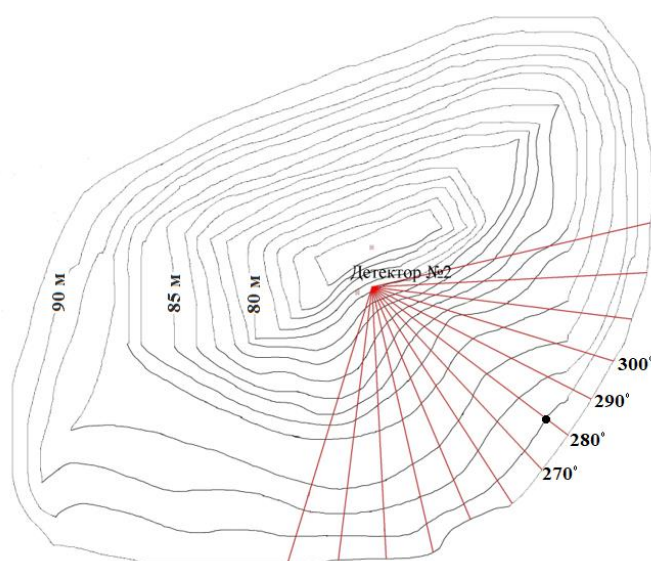


Рисунок 4.63 Схема рельефа склона для моделирования потоков мюонов в заданных направлениях по углу φ . Шаг по углу φ составляет 10 градусов; подписаны лучи, соответствующие углам 270° – 300° градусов. Черная точка указывает на уровень 90 м в Балтийской системе, детектор № 2 расположен на уровне 80 м.

На рисунке 4.64 показаны профили холма для двух углов по φ (270° и 300°) и угла $\theta = 20^\circ$ к горизонту: в первом случае ($\varphi = 270^\circ$, рис. 4.64 а) профиль выпуклый, а во втором ($\varphi = 300^\circ$, рис. 4.64 б) – с впадиной. В результате мюоны

проходят разные пути в грунте, что сказывается на распределениях по (θ, φ) (см. рис. 4.65). При углах к горизонту меньше $\theta < 15^\circ$ различие не так очевидно, т.к. путь мюонов целиком проходит в грунте, если нет дополнительных пустот на пути.

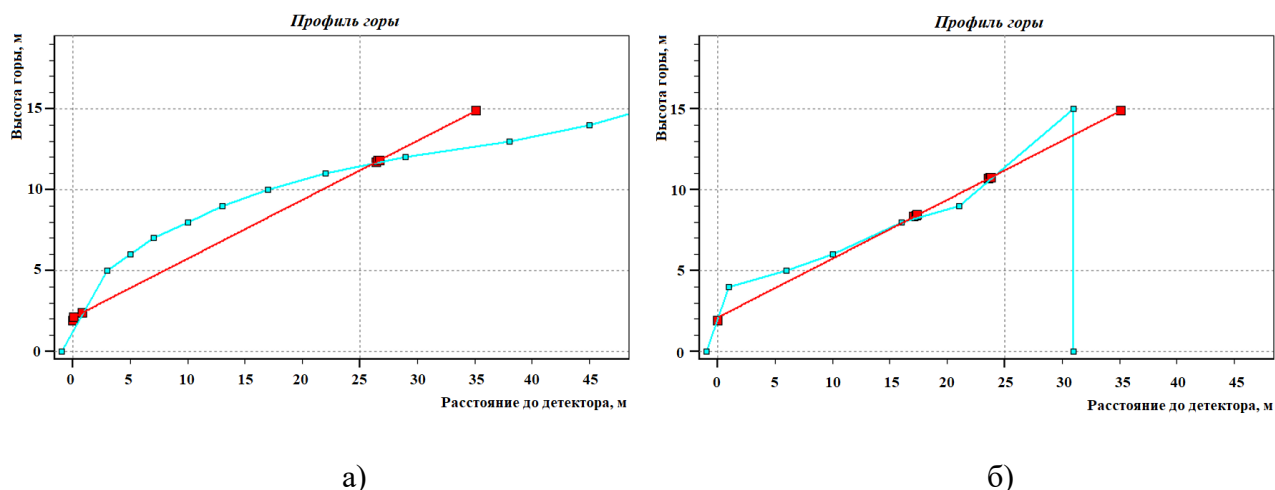


Рисунок 4.64 Профили склона (голубые линии): а) $\varphi=270^\circ$, $\theta=20^\circ$; б) $\varphi=300^\circ$, $\theta=20^\circ$. Красная линия обозначает траекторию мюона.

При моделировании показаний детектора оценивалась величина потоков мюонов при разных значениях θ и φ с учетом рельефа местности. Чтобы сравнить результаты расчётов с экспериментальными данными, величина потока была преобразована в количество частиц, попадающих в элемент объёма, ограниченный данными θ и φ , для чего величина потока умножалась на величину $\sin\theta$. На рисунке 4.65 показано распределение полученного с помощью модельных расчётов числа мюонов в детекторе №2, как функция углов θ и φ . Распределение на рисунке 4.65 учитывает только известный рельеф местности, поэтому возможные отклонения от этого распределения, полученные в эксперименте, могут свидетельствовать о наличии полостей и уплотнений.

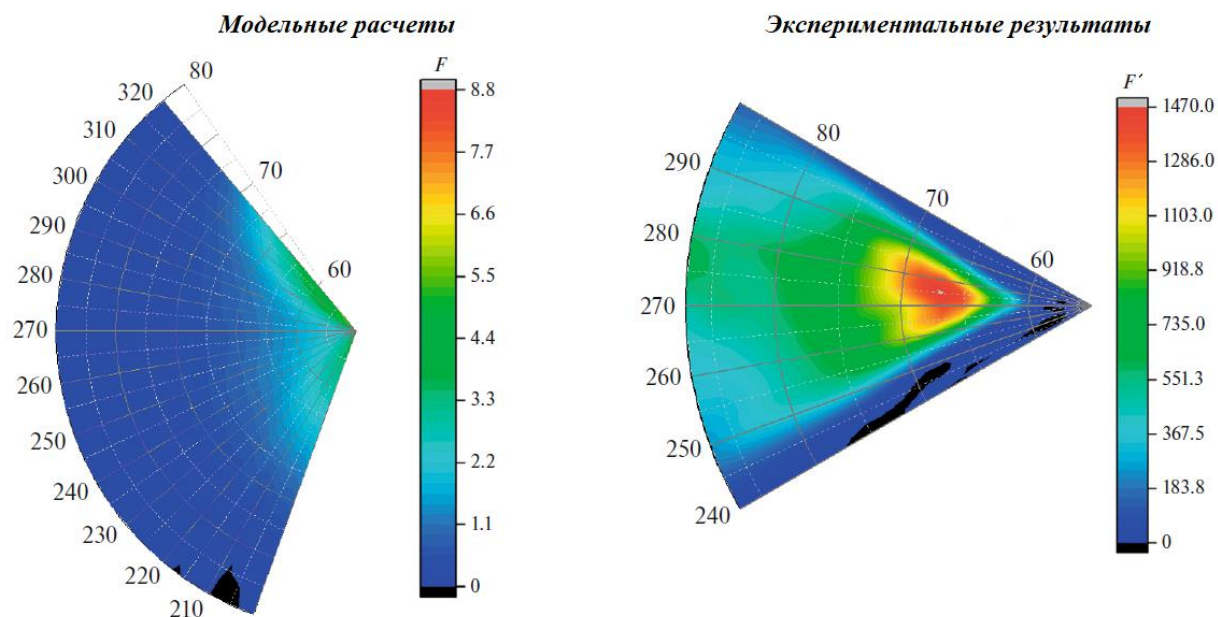


Рисунок 4.65 Распределение числа частиц в элементе телесного угла ($\Delta\varphi, \Delta\theta$) как функция углов φ и θ для детектора №2 в прямом направлении для модельных расчетов $F(\varphi, \theta)$ и экспериментальных результатов $F'(\varphi, \theta)$. Радиусы соответствуют линиям постоянства угла φ , а дуги — линиям постоянства угла θ . Цветная вертикальная шкала отображает число зарегистрированных мюонов.

На рисунке 4.65 показаны экспериментальные распределения для числа мюонов, зарегистрированных в детекторе №2 в направлении вперёд. По сравнению с результатом моделирования, где распределение равномерно, в экспериментальном распределении наблюдается избыток числа мюонов в диапазоне $\varphi=270^\circ \div 280^\circ$ и $\theta > 80^\circ$ (красная и зелёная область), что свидетельствует о наличии полости с угловым размером $20^\circ \div 40^\circ$, расположенной перед детектором №2.

На рисунке 4.66 представлено распределение по углу θ треков мюонов, зарегистрированных в детекторе №2, для нескольких значений $\varphi \sim 270^\circ$. Распределение демонстрирует большое количество мюонов вблизи горизонта с углами $\theta \geq 80^\circ$.

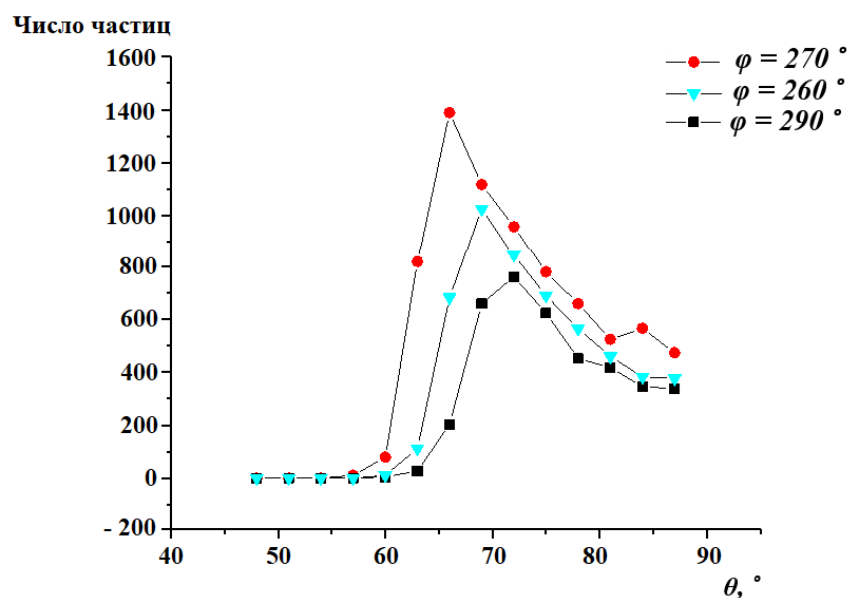


Рисунок 4.66 Распределение треков мюонов в детекторе №2 по углу θ к вертикали в окрестности угла $\varphi=270^\circ$.

Представленные на рисунке 4.66 результаты показывают, что распределения по зенитному углу не стремятся к нулю при $\theta \sim 80 \div 90^\circ$ в системе координат, связанной с землёй. В связи с этим необходимо отметить следующее: вертикально расположенные детекторы способны регистрировать мюоны, идущие вблизи горизонта и даже из-под земли. Такие мюоны возникают в результате их перерасеяния в грунте (альбедные мюоны) [124]. Угловое распределение таких частиц существенно отличается от известной зависимости величины потока атмосферных мюонов от зенитного угла $\varphi = \cos^n(\theta)$, где $n=1,72 \div 2,1$ [81,123]. Поскольку в данном эксперименте детекторы были расположены на глубине около 15 метров от уровня земли, они должны были регистрировать эти мюоны в дополнение к частицам, приходящим из атмосферы, что и демонстрируют полученные экспериментальные распределения по θ вблизи $80 \div 90$ градусов к горизонту.

Для проверки достоверности методики распознавания скрытых неоднородностей в материале объекта была проведена идентификация по алгоритму Ж.Т. Садыкова проверяемых визуально видимых объектов, попадающих в поле зрения детекторов. Для примера приведены

экспериментальные результаты детектора №10, показано положение этого детектора на увеличенной части плана монастыря, см. рис. 4.67.

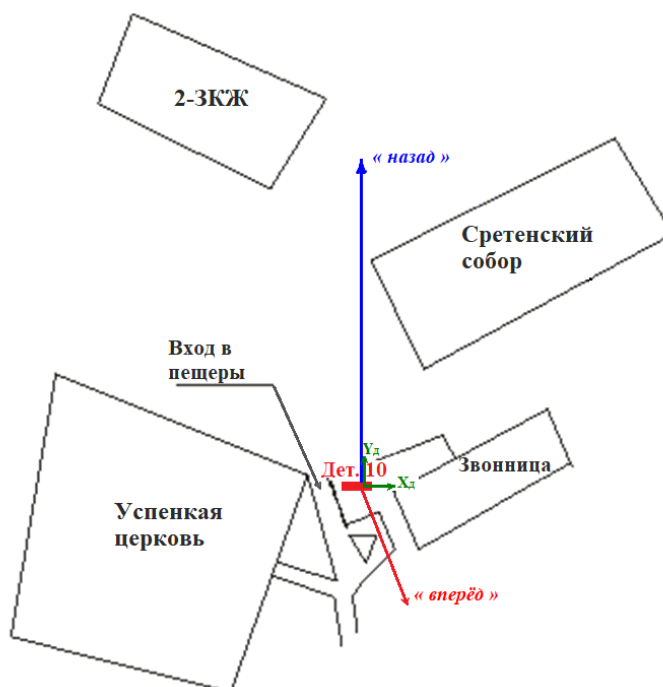


Рисунок 4.67 Положение детектора №10 на плане монастыря. Зелеными стрелками показаны оси координат X_d , Y_d в системе координат детектора. Красной стрелкой показано направление зоны видимости детектора «вперёд», синей стрелкой - направление зоны видимости детектора «назад».



Рисунок 4.68 Фотография детектора №10 на месте экспозиции (слева), общий вид оконного проёма рядом с входом в пещеры и переулка между зданиями (справа).

Детектор №10 был установлен в оконном проёме в помещении между Успенским храмом и Звонницей таким образом, что в направлении назад был ориентирован на переулок между зданиями, см. рис. 4.68.

В узком телесном угле наблюдения детектора №10 в направлении назад ($\varphi \sim 80^\circ \div 90^\circ$) находился проход между Сретенским собором и зданием, помеченным на рис. 4.67 как 2-ЗКЖ (синее направление на рис. 4.67). Этому направлению на рис. 4.69 соответствует локальный максимум, наиболее ярко выраженный при углах $\theta = 84^\circ$ и $\theta = 87^\circ$ (рис. 4.69 б). В направлении вперёд в распределении наблюдается локальный максимум при углах $275^\circ < \varphi < 290^\circ$, что связано с наличием коридора между стеной треугольной формы и сплошной стеной (красное направление на рис. 4.67).

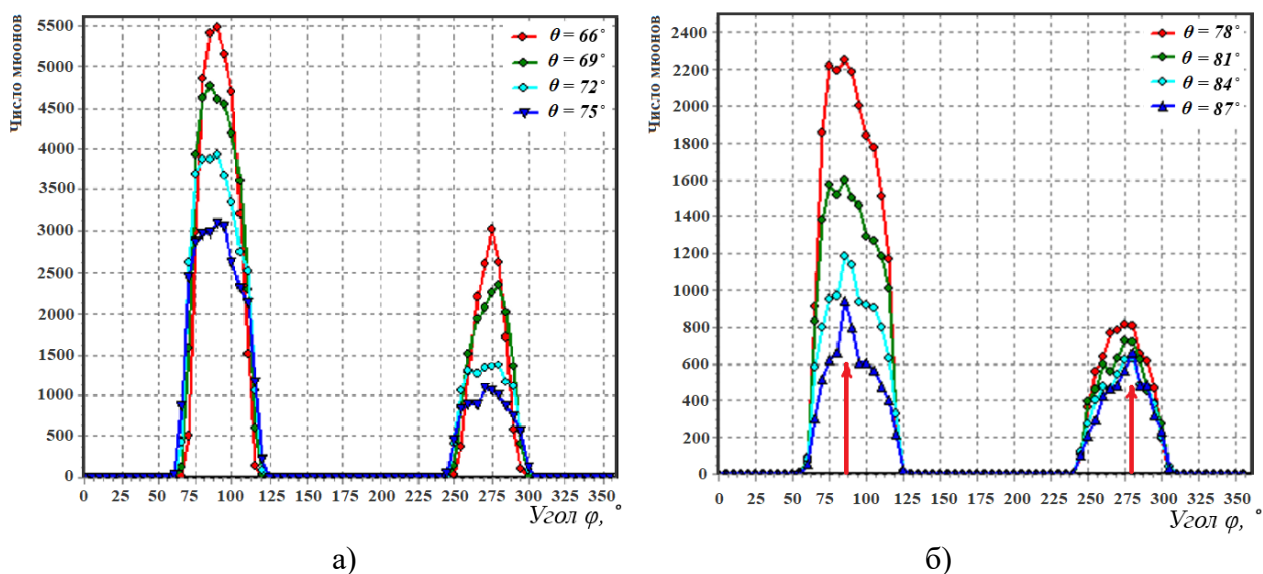


Рисунок 4.69 Распределения потоков мюонов по φ при заданных θ по данным детектора №10, красными стрелками показаны максимумы распределений, соответствующие проходу между Сретенским собором и зданием 2-ЗКЖ, наличию коридора между стеной треугольной формы и сплошной стеной (схематично представлено на рис. 4.67).

Полученные результаты свидетельствуют о правильности подхода к обработке и интерпретации данных, поскольку зарегистрированные неоднородности на распределениях потоков мюонов соответствуют наблюдаемым архитектурным особенностям, находящимся в поле зрения детекторов.

Таким образом, итоговый алгоритм поиска и идентификации скрытых неоднородностей пещерного храма монастыря на основе данных, полученных методом мюнографии с помощью ядерно-эмульсионных детекторов, включал несколько основных этапов:

Шаг 1. Обработка данных горизонтального фонового детектора и определение поправки на эффективность детектора (см. рис. 4.62).

Шаг 2. Построение угловых распределений в системе координат земли с заданными шагами по углам. Величина шагов в бинах по θ и φ бралась равной $1.0^\circ, 1.5^\circ, 2.0^\circ, 2.5^\circ$.

Шаг 3. Нормирование полученных распределений на данные вертикального фонового детектора. Например, если в бине (i, j) по φ и θ детектор обнаруживает $N_{i,j}$ мюонов, а фоновый детектор - $N_{i,j}^{Background}$ мюонов, то искомое распределение определяется как $N_{i,j}^{Norm} = \frac{N_{i,j}}{N_{i,j}^{Background}}$.

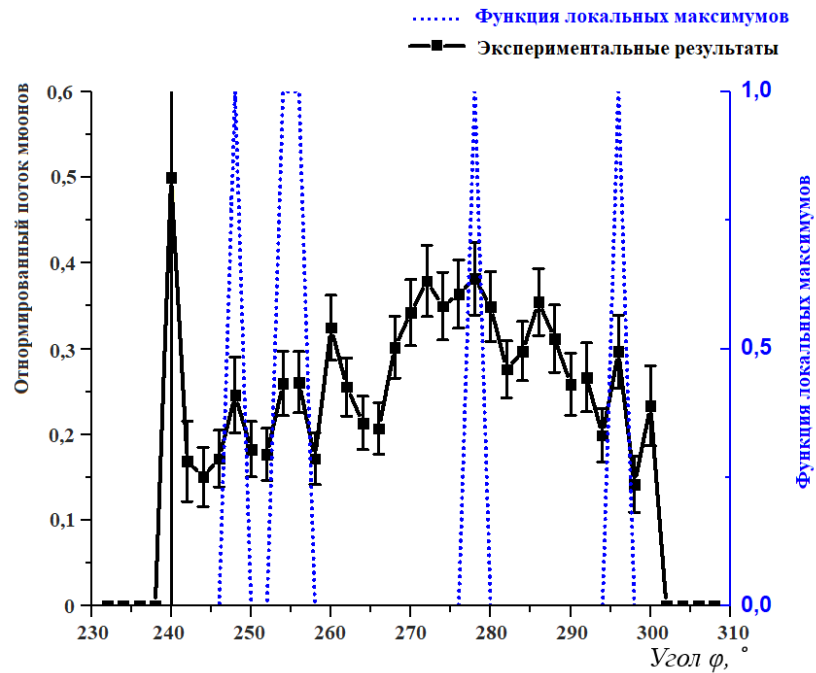
Шаг 4. Определение положений локальных максимумов распределений (связанных с наличием полостей) по φ в нормированных распределениях для каждого заданного угла θ . Затем определение положений локальных максимумов распределений по θ для каждого заданного угла φ .

При определении положения каждого локального максимума учитывался интервал ошибок, пропорциональный $\sqrt{N}$, где N – количество мюонов, попадающих в интервал углов $(\Delta\varphi_i, \Delta\theta_j)$. Локальный максимум в распределении по φ при заданном θ считался найденным только в том случае, когда

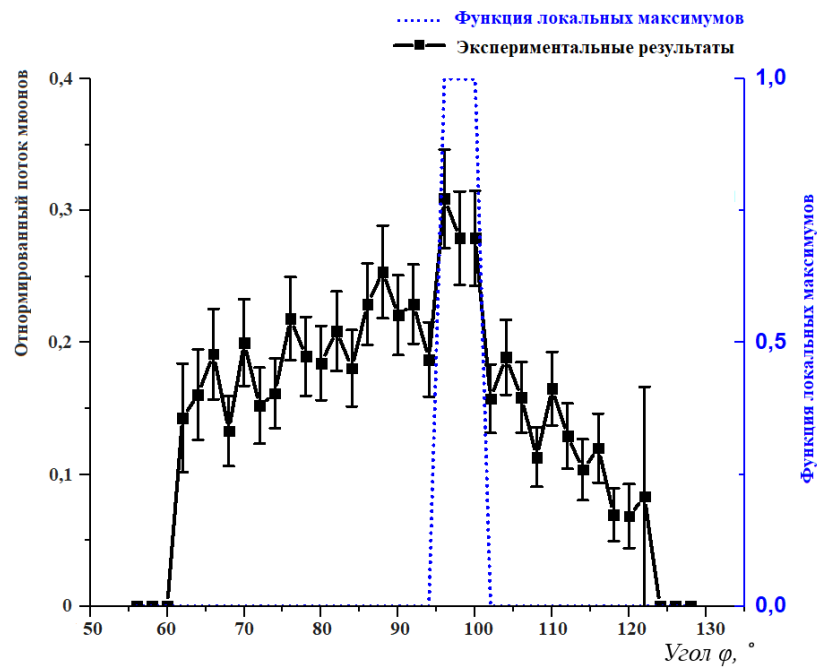
$$\begin{cases} N_{i,j}^{Norm} - \frac{\sqrt{N_{i,j}}}{N_{i,j}} N_{i,j}^{Norm} > N_{i+1,j}^{Norm} + \frac{\sqrt{N_{i+1,j}}}{N_{i+1,j}} N_{i+1,j}^{Norm} \\ N_{i,j}^{Norm} - \frac{\sqrt{N_{i,j}}}{N_{i,j}} N_{i,j}^{Norm} > N_{i-1,j}^{Norm} + \frac{\sqrt{N_{i-1,j}}}{N_{i-1,j}} N_{i-1,j}^{Norm} \end{cases}$$

Функция положений максимумов может принимать только два значения: 1, если максимум в этой точке есть, и 0 – если максимума нет. Рисунок 4.70

иллюстрирует алгоритм поиска локальных максимумов распределений потоков мюонов по φ при заданном θ .



а)



б)

Рисунок 4.70 Иллюстрация алгоритма поиска локальных максимумов распределений потоков мюонов по φ при заданном θ для детектора 2. Чёрным показаны распределения мюонов по φ при $\theta=80^\circ$, синим пунктиром – функция положения локальных максимумов на этом распределении при $\Delta\varphi=2^\circ$; $\Delta\theta=2^\circ$. а) направление детектора «вперёд», б) направление детектора «назад».

При этом, например, рисунок 4.70 а демонстрирует, что функция максимума равна 1 также при $\varphi = 278^\circ$, где в распределении по φ максимум не наблюдается с учетом величины статистической ошибки. Это связано с тем, что в этой точке есть максимум по θ при $\varphi = 278^\circ$, что демонстрирует рисунок 4.71.

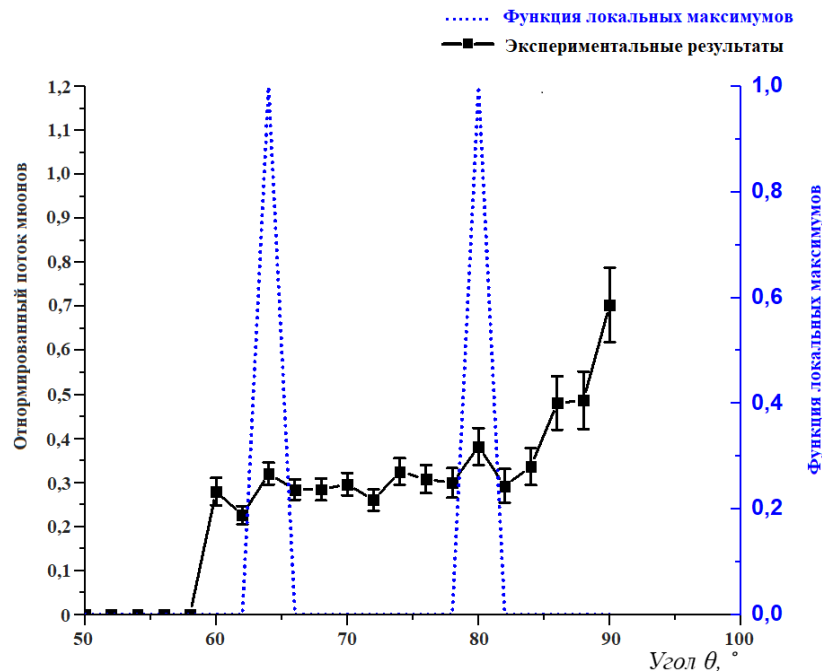
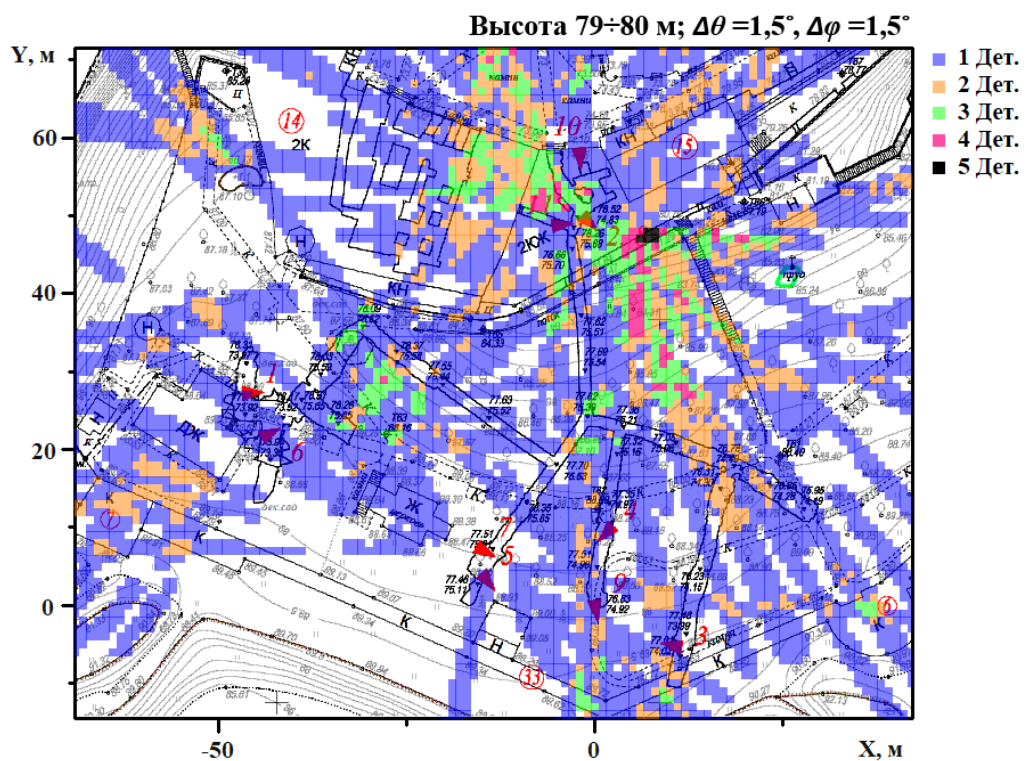


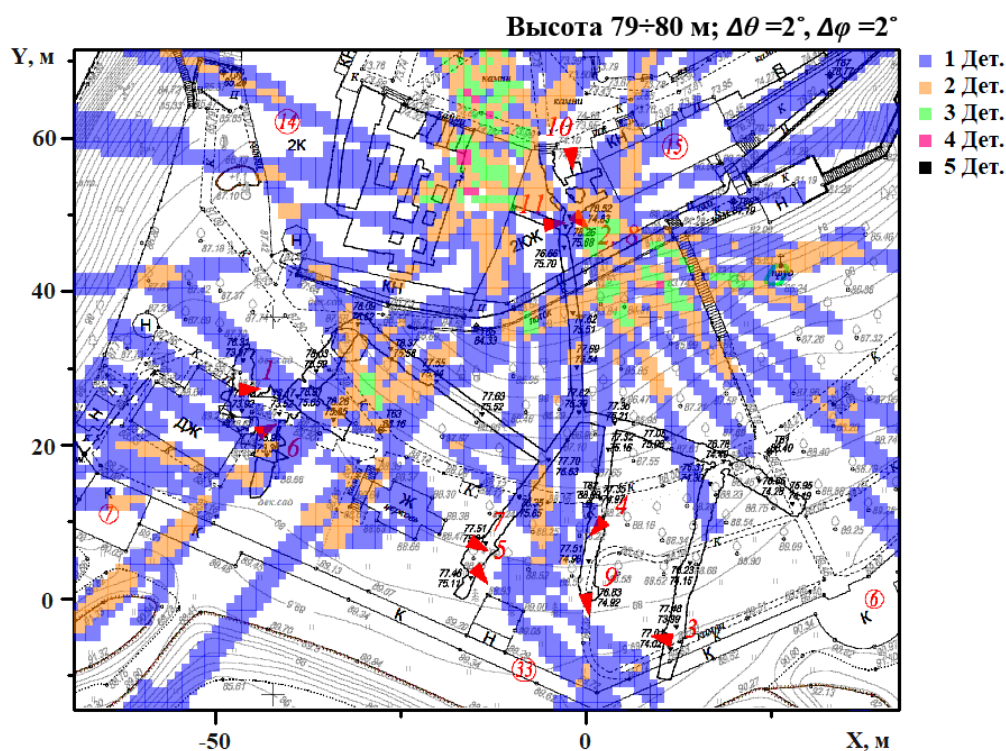
Рисунок 4.71 Иллюстрация алгоритма поиска локальных максимумов распределений потоков мюонов по θ при заданном φ для детектора 2. Чёрным показаны распределения мюонов по θ при $\varphi = 278^\circ$, синим пунктиром – функция положения локальных максимумов; $\Delta\varphi = 2^\circ$; $\Delta\theta = 2^\circ$.

Если неизвестная неоднородность располагается относительно близко к детектору, её угловой размер может превышать выбранную величину разбиений $\Delta\varphi$ или $\Delta\theta$. Поэтому при обработке данных производился поиск максимумов шириной 1, 2 или 3 бина и, если в соседнем бине не было зарегистрированных треков, максимум не учитывался.

Шаг 5. Поиск пересечений локальных максимумов: для каждого детектора перебирались все возможные направления φ , θ , и если интервал направлений $(\varphi, \varphi + \Delta\varphi)$, $(\theta, \theta + \Delta\theta)$, соответствующий локальному максимуму распределения треков по φ и θ , пересекает данный элемент объёма, то он наносится на карту. Таким образом, строится функция $G(X, Y, Z)$ с интервалом по каждой переменной 1 м, характеризующая взаимное положение локальных максимумов от разных детекторов. Если элемент объёма с координатами (X, Y, Z) пересекает локальный

максимум потока мюонов, зарегистрированный только одним детектором, то функции $G(X,Y,Z)$ присваивается значение 1; если в элементе объема пересекаются локальные максимумы от двух детекторов, то $G(X,Y,Z)=2$, и т. д. Наиболее вероятные расположения скрытых полостей находятся там, где пересекаются локальные максимумы от наибольшего числа детекторов, что можно наблюдать на графике функции $G(X,Y,Z)$. Рисунок 4.72 демонстрирует наложение функции $G(X,Y,Z)$ в интервале высот $Z=79\div 80$ м на карту местности для двух вариантов разбиения по углам (биннинга): а) $\Delta\varphi=1.5^\circ$; $\Delta\theta=1.5^\circ$ и б) $\Delta\varphi=2^\circ$; $\Delta\theta=2^\circ$.



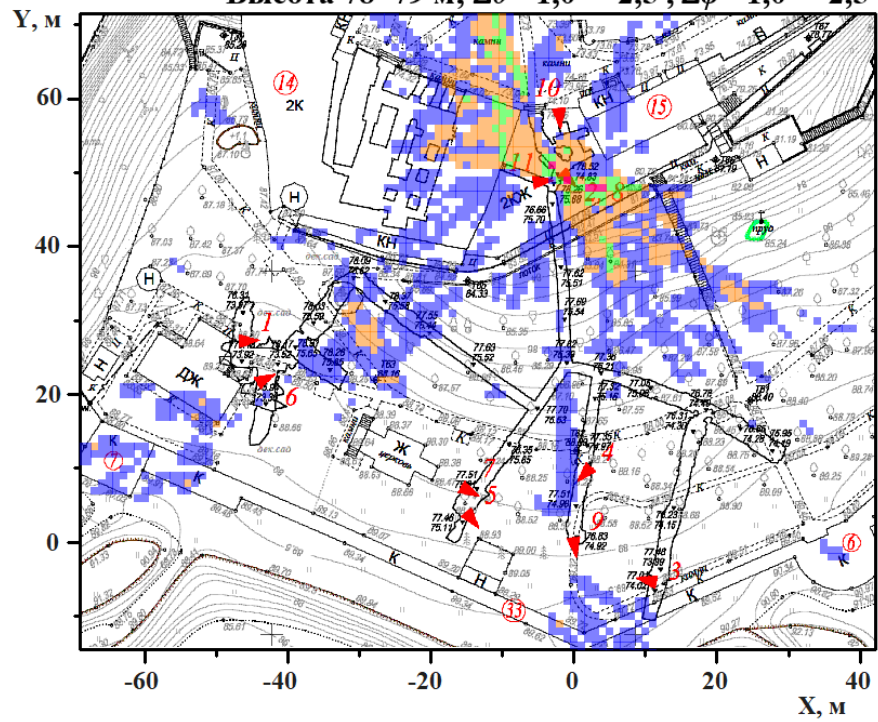


б)

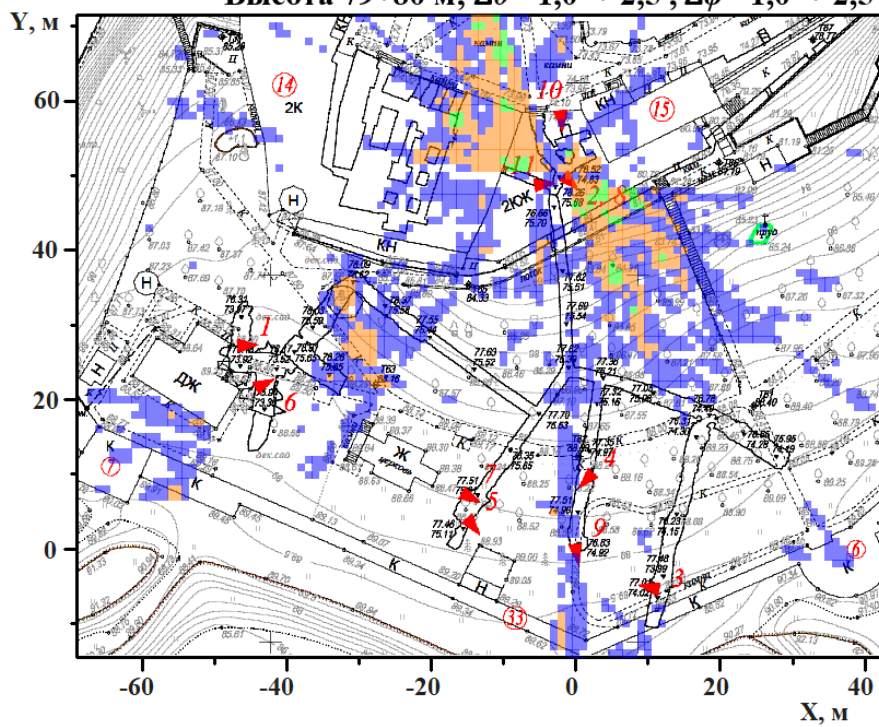
Рисунок 4.72 Карты пересечения локальных максимумов на высоте 79÷80 м (график функции $G(X,Y,Z)$ на фиксированной глубине $Z=79\div80$ м). Светло-фиолетовым цветом обозначены направления локальных максимумов, зарегистрированных 1 детектором, оранжевым – 2 детекторами, светло-зелёным – 3 детекторами, розовым – 4 детекторами, чёрным – 5 детекторами. Разбиения по углам: а) $\Delta\varphi=1.5^\circ$, $\Delta\theta=1.5^\circ$; б) $\Delta\varphi=2^\circ$, $\Delta\theta=2^\circ$.

Рисунки 4.72 а,б демонстрируют, что в зависимости от биннинга, графики функции $G(X,Y,Z)$ могут различаться. Чтобы снизить эту зависимость, был построен график функции, являющийся суммой функций $G(X,Y,Z)$, полученных для разных биннингов: $\Delta\varphi = \Delta\theta = 1,0^\circ$, $\Delta\varphi = \Delta\theta = 1,5^\circ$, $\Delta\varphi = \Delta\theta = 2,0^\circ$, $\Delta\varphi = \Delta\theta = 2,5^\circ$, причём в этой сумме учитывалось только $G(X,Y,Z) > 1$, то есть только те элементы объёма, в которых пересеклись хотя бы 2 локальных максимума от разных детекторов в рамках одного биннинга. Результат представлен на рисунке 4.73 на разных высотах: от 76 до 81 м.

Высота 78÷79 м; $\Delta\theta=1,0^\circ \div 2,5^\circ$, $\Delta\varphi=1,0^\circ \div 2,5^\circ$



Высота 79÷80 м; $\Delta\theta=1,0^\circ \div 2,5^\circ$, $\Delta\varphi=1,0^\circ \div 2,5^\circ$



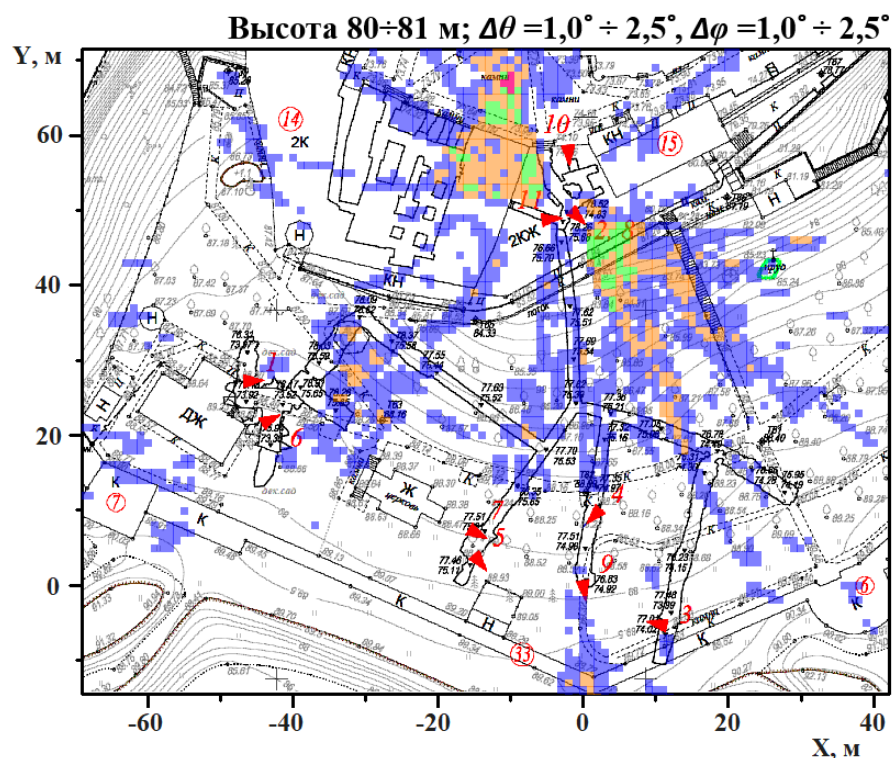


Рисунок 4.73 Суммарные карты пересечения локальных максимумов по четырём вариантам биннинга: ($\Delta\varphi=\Delta\theta=1,0^\circ$, $\Delta\varphi=\Delta\theta=1,5^\circ$, $\Delta\varphi=\Delta\theta=2,0^\circ$, $\Delta\varphi=\Delta\theta=2,5^\circ$). Синий цвет соответствует $4 \leq G(X,Y,Z) < 8$; оранжевый – $8 \leq G(X,Y,Z) < 12$; зелёный – $12 \leq G(X,Y,Z) < 16$; розовый – $16 \leq G(X,Y,Z)$. Интервалы высот: $Z=76 \div 77$ м; $Z=77 \div 78$ м; $Z=78 \div 79$ м; $Z=79 \div 80$ м; $Z=80 \div 81$ м.

На рисунке 4.74 схематично обозначены местоположения полостей, найденных на исследуемой территории пещер Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря:

полость 1 (на высоте 77-79 метров) – склеп, обнаруживают как минимум 4 детектора как вне зависимости от размера бина на рис. 4.72, так и на суммарной карте на рис. 4.73;

полость 2 (на высоте 77-79 метров), которая продолжается вправо в виде коридора;

полость 3 (на высоте 79-80 метров) между детекторами №4 и 9 - пустота между Братской и Троицкой улицами;

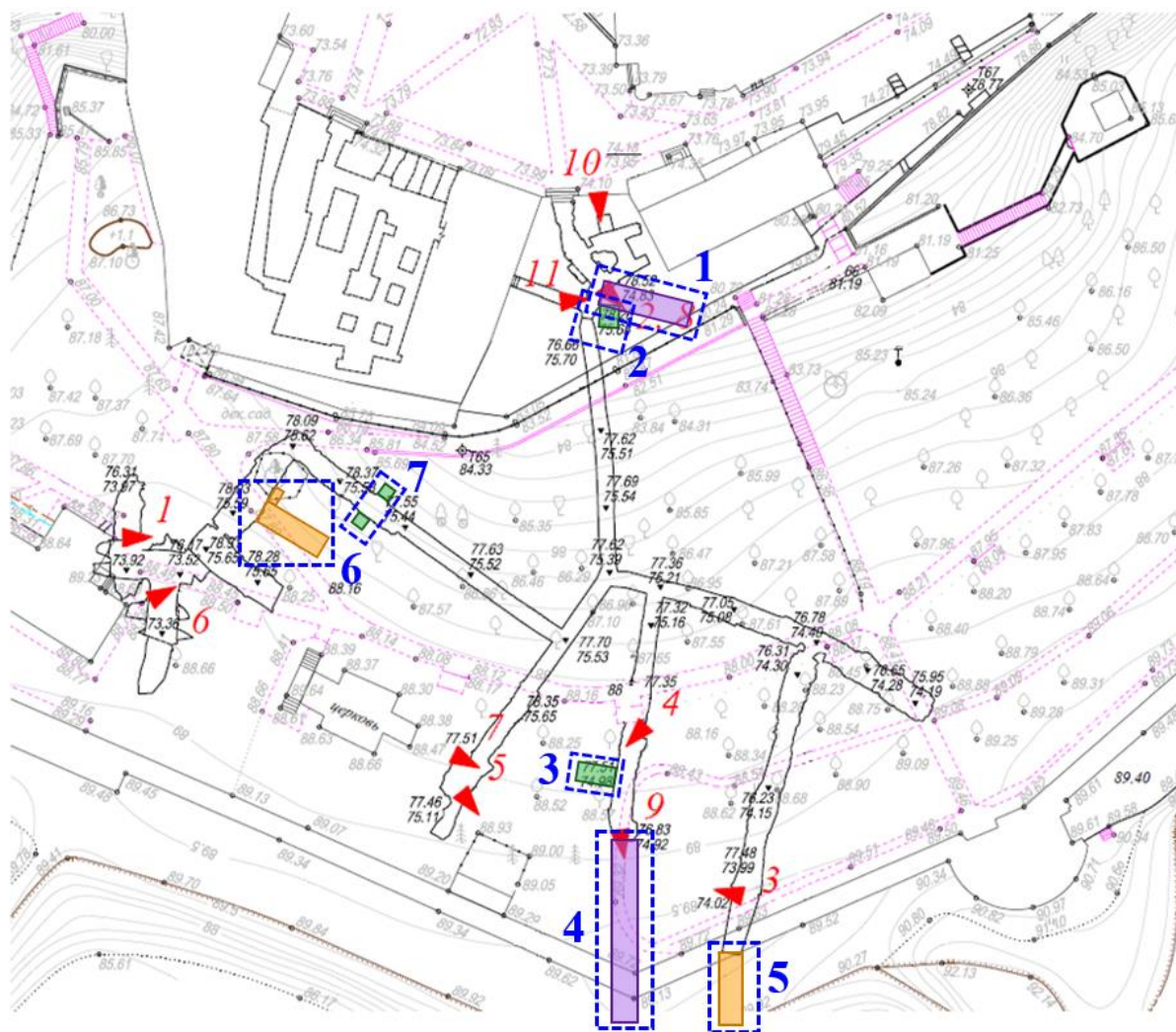
полость 4 (на высоте 79-81 метр) напротив детектора №9 (продолжение Троицкой улицы вдоль её основного направления);

полость 5 (на высоте 77-78 метров) - в продолжении Храмовой улицы;

полость 6 (на высоте 79-81 метров),

полость 7 (на высоте 77-78 метров) - напротив детектора №6.

Все найденные полости видны на карте пересечения локальных максимумов, зарегистрированных одновременно несколькими детекторами, как в зависимости от размеров бинов, так и на суммарной карте при $8 \leq G(X,Y,Z) < 12$ (оранжевые квадраты на рис. 4.74).



На рисунках 4.75 - 4.76 в качестве примера представлены наиболее крупные найденные в данном эксперименте неизвестные полости, совмещенные с выполненной лидарной съемкой исследуемых пещер.



Рисунок 4.75 Лидарная съемка видимых границ «улиц» «Богом зданных пещер» с совмещенными экспериментальными результатами. Неизвестные ранее невидимые объекты обозначены зелеными квадратами размером 1 м^3 каждый. Белыми пунктирными линиями обозначены границы *полостей 1-2* на рисунке 4.74.

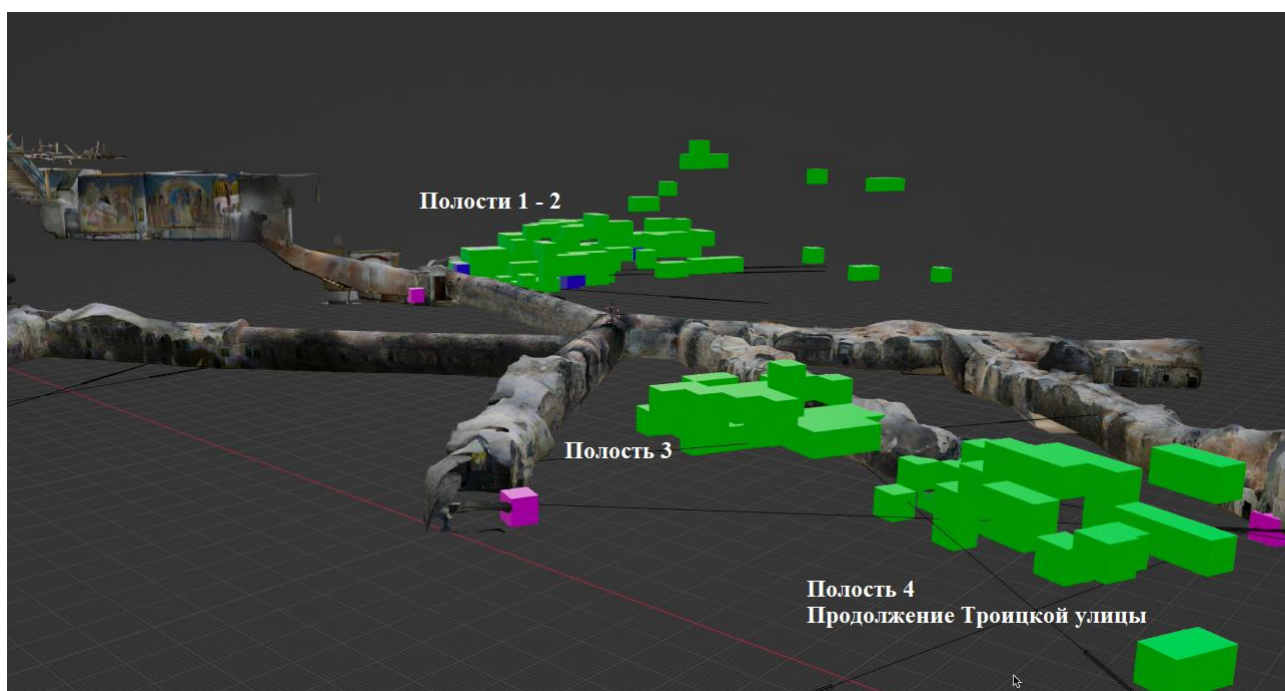


Рисунок 4.76 Лидарная съемка видимых границ «улиц» «Богом зданных пещер» с совмещенными экспериментальными результатами. Неизвестные ранее невидимые объекты обозначены зелеными квадратами размером 1 м^3 каждый. На рисунке представлены наиболее крупные найденные в эксперименте *полости 1-2* (склеп и коридор за ним), *полость 3* (продолжение Троицкой улицы) и *полость 4* (коридор перпендикулярный Троицкой улице), отмеченные также схематично на рисунке 4.74.

По результатам эксперимента удалось обнаружить скрытые под землёй ранее неизвестные полости пещерного храма Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря: склеп за иконой на входе и коридор, продолжающийся

от него, полость между детекторами 4 и 9 (пустота между Братской и Троицкой улицами), полость напротив детектора 9 (продолжение Троицкой улицы вдоль её основного направления), а также полость напротив детектора 6. Размеры обнаруженного склепа при входе в храм оцениваются примерно в $2,5 \times 2,5$ м². От склепа в направлении, перпендикулярном Главной улице, отходит коридор шириной от 1 до 3 метров и длиной до 12 метров.

Проведённый эксперимент убедительно демонстрирует, что авторские технические решения и методы обработки и анализа данных для мюонографических работ на основе эмульсионных трековых детекторов позволяют исследовать внутренние особенности структуры объектов природного и искусственного происхождения, не разрушая их, что открывает новые возможности, в том числе, для изучения и сохранения памятников культурного наследия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. На основе уникальной методики микроскопического анализа и контроля качества эмульсионных слоев восстановлена технология производства ЯФ для российского производителя, в настоящее время ЯФ производится в промышленных масштабах до $\sim 100 \text{ м}^2$ в год для использования в российских научно-исследовательских институтах и в международных научных организациях.

2. Реализован эксперимент по старению ЯФ в различных условиях и изучены изменения свойств ЯФ с течением времени.

3. Эмпирическим путем подобраны параметры для “рефрешинг” процедуры (уничтожения фона, набранного при длительном хранении эмульсии от момента ее производства) ЯФ российского производства для экспериментов с регистрацией однозарядных частиц, прежде всего, в фундаментальных исследованиях на ускорителях с минимальной потерей эффективности фотоэмульсионного слоя.

4. Адаптировано программное обеспечение сканирующего комплекса ПАВИКОМ для обработки и физического анализа экспериментов OPERA, SND@LHC. Результаты эксперимента OPERA, отсканированных и обработанных в ФИАН, занесены в единую базу данных эксперимента в ЦЕРН.

5. Реализован эксперимент по оценке минимального количества фотоэмульсионных слоев в детекторе для мюнографических экспериментов.

6. Проведены первые в России тестовые эксперименты по мюнографии с использованием эмульсионных детекторов, выработаны методические подходы для конструирования детекторов и определения оптимальных условий экспозиции.

7. Впервые в России проведена серия мюнографических экспериментов по исследованию памятников культурного наследия:

архитектурный комплекс цитадели Нарын-Кала (г. Дербент, Дагестан), Свято-Троицкий Данилов монастырь (г. Переславль-Залесский), подземная часть храмового комплекса Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря (Псковская область, г. Печоры). Выявлены ранее неизвестные структурные особенности исследуемых объектов.

8. Проведённая серия мюнографических экспериментов убедительно демонстрирует, что авторские технические решения и методы обработки и анализа данных позволяют исследовать внутренние особенности структуры объектов без повреждения их целостности, что открывает новые возможности в самых различных областях: для мониторинга крупных природных объектов (вулканов, геологических плит, карстовых пещер, ледников), промышленных и архитектурных конструкций (шахт и рудников, установок ядерно-энергетического комплекса, скрытых от прямого наблюдения фрагментов зданий), исследования объектов культурного наследия, анализа сейсмических процессов и др.

Список цитированной литературы:

1. Alexandrov A.B. et al. System for processing emulsion data of the OPERA experiment using the PAVICOM facility and prospects of its application to scan objects by muon radiography methods // Bull.Lebedev Phys.Inst. 2012. Vol. 39. P. 269–276.
2. OPERA collaboration, Shchedrina T. Determination of the energy measurement accuracy for charged particles by their range in nuclear photoemulsion // JINST. 2012. Vol. 39. P. 300–304.
3. FASER collaboration. New Physics Results from the FASER Experiment // PoS ICHEP2024. 2025. Vol. 251.
4. Collaboration News. Directional Dark Matter Search with Nuclear Emulsion // J.Phys.Conf.Ser. 2020. Vol. 1468, № 1. P. 012041.
5. FOOT collaboration. The FOOT experiment: A first measurement of nuclear fragmentation cross section for hadrontherapy // Nuovo Cim.C. 2023. Vol. 46, № 4. P. 105.
6. Alexandrov A. et al. Experiments on muon radiography with emulsion track detectors // Proceedings, 19th International Seminar on High Energy Physics (Quarks 2016). 2016. P. 02022.
7. Alexandrov A. et al. A new fast scanning system for the measurement of large angle tracks in nuclear emulsions // J. Instrum. Institute of Physics Publishing, 2015. Vol. 10, № 11.
8. OPERA collaboration, Shchedrina T. Final results of the search for ν_μ to ν_e oscillations with the OPERA detector in the CNGS beam // JHEP. 2018. Vol. 06. P. 151.
9. Albanese R. et al. Measurement of the muon flux at the SND@LHC experiment // Eur. Phys. J. C. 2024. Vol. 84, № 90. P. 84–90.
10. Alexandrov A.B. et al. Search for Hidden Rooms in the Holy Trinity Danilov Monastery by the Muon Radiography Method // Phys.Atom.Nucl. 2021. Vol. 84, № 6. P. 855–859.
11. Садыков Ж. Экспериментальные исследования на основе методики трековых детекторов в физике элементарных частиц, рукопись кандидатской диссертации. 2025.
12. Kinoshita S. The photographic action of the α -particles emitted from radio-active substances // Proc. R. Soc. A. 1910. Vol. Mathematic. P. 432–453.
13. Powell C.F. et al. A new photographic emulsion for the detection of fast charged particles // J. Sci. Instrum. 1946. Vol. 23, № 5. P. 102–106.
14. Powell C.F. et al. The Study of Elementary Particles by the Photographic Method // Phys. Today. AIP Publishing, 1960. Vol. 13, № 9. P. 45–45.

15. Barkas W.H., Massey H., Yagoda H. Nuclear Research Emulsions // Phys. Today. 1964. Vol. 17, № 3. P. 63.
16. Ochialini G.P.S. et al. Processes involving charged mesons // Nature. 1947. Vol. 159. P. 694–697.
17. Dobrotin N.A. International cosmic ray conference // Sov. Phys. Usp. 1959. Vol. 49. P. 679–691.
18. Kaplon M.F., Ritson D.M. Emulsion Cloud-Chamber Observations on the Interactions of High Energy Primary Cosmic Radiation // Phys.Rev. 1952. Vol. 88, № 15. P. 386.
19. Zatsepin V.I. et al. Energy spectra of primary protons and other nuclei at energies of 10 -100 TeV/particle // Proc.21 ICRC. 1990. Vol. 3. P. 77.
20. Asakimori K., Burnett T.H., Cherry M.L. исследования состава и энергетического спектра космических лучей сверхвысоких энергий // Proc.21 ICRC. 1991. Vol. 2. P. 97.
21. CHORUS Collaboration. Measurement of charm production in neutrino charged-current interactions // New J. Phys. 2011. Vol. 13.
22. CHORUS Collaboration. Progress report on CHORUS WA95 for the 1992 Cogne Meeting of the SPSLC. 1992.
23. DONuT collaboration. Final tau-neutrino results from the DONuT experiment // Phys. Rev. D - Part. Fields, Gravit. Cosmol. 2008. Vol. 78, № 5.
24. OPERA collaboration. Final results on neutrino oscillation parameters from the OPERA experiment in the CNGS beam // Phys. Rev. D. 2019. Vol. 100.
25. OPERA collaboration, Shchedrina T. OPERA tau neutrino charged current interactions // Sci.Data. 2021. Vol. 8, № 1. P. 218.
26. Alexandrov A.B. et al. Completely automated measurement facility (PAVICOM) for track-detector data processing // Nucl. Instr. & Meth. 2004. Vol. 535, № 1–2. P. 542–545.
27. Aleksandrov A.B. et al. System for processing emulsion data of the OPERA experiment using the PAVICOM facility and prospects of its application to scan objects by muon radiography methods // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2012. Vol. 39. P. 269–276.
28. Alexandrov A. et al. A new fast scanning system for the measurement of large angle tracks in nuclear emulsions // J. Instrum. Institute of Physics Publishing, 2015. Vol. 10, № 11.
29. Alexandrov A. et al. Upgrade and new applications of the automated high-tech scanning facility PAVICOM for data processing of track detectors // Meas. J. Int. Meas. Confed. 2022. Vol. 187.

30. Ariga A. et al. Nuclear Emulsions // Part. Phys. Ref. Libr. 2020. P. 383–438.
31. Fabjan W., Schopper H. Detectors for Particles and Radiation // Part. Phys. Ref. Libr. 2020. Vol. 2.
32. SND@LHC Collaboration meetings. P. <https://snd-lhc.web.cern.ch/meetings>.
33. Shchedrina T.V. Renewal of emulsion production in Russia. 2010.
34. Shchedrina T.V. Manual pouring of Slavich gel. 2011.
35. Shchedrina T.V. Results for different development conditions. 2011.
36. Alexandrov A.B. et al. Muon radiography method for fundamental and applied research // Phys.Usp. 2017. Vol. 60, № 12. P. 1277–1293.
37. SHiP Collaboration. The SHiP experiment at the proposed CERN SPS Beam Dump Facility // Eur. Phys. J. C. 2022. Vol. 82, № 486.
38. Gorbunov S.A., Konovalova N.S. New Experiment NEWSdm for Direct Searches for Heavy Dark Matter Particles // Phys. At. Nucl. 2020. Vol. 83, № 1. P. 83–91.
39. Galli F. GENVIRO [Electronic resource]. URL: <https://www.fratelligalli.com/Galli-Climatic Chamber-Genviro-EN.htm>.
40. Коновалова Н.С., Старков Н.И., Щедрина Т.В. Старение ядерной фотографической эмульсии в различных условиях // Краткие Сообщения по Физике ФИАН. 2022. Vol. 8. P. 3–12.
41. Alexandrov A. et al. Upgrade and new applications of the automated high-tech scanning facility PAVICOM for data processing of track detectors // Measurement. 2022. Vol. 187. P. 110244.
42. Vasilev V. et al. Modernization of the Automated Scanning Complex for Data Processing of the SND@LHC Experiment // Phys. At. Nucl. 2024. Vol. 86, № 10. P. 2251–2255.
43. SND@LHC collaboration, Shchedrina T. Observation of Collider Muon Neutrinos with the SND@LHC Experiment // Phys.Rev.Lett. 2023. Vol. 131, № 3. P. 031802.
44. Chernavskaya O.D. et al. CERN experiment EMU-15 on ultrarelativistic very heavy ion central collision // PRINT-94-0070 (LEBEDEV). 1994.
45. Boos E.G., Chernavskaya O.D., Chubenko A.P. Investigation of central Au - Au and Pb Pb interactions at energies of 160-GeV/nucleon with the help of emulsion magnetic chamber: Proposal to the SPSC. 1992.
46. Бабаев П.А. et al. Оценка эффекта фрагментации при регистрации сверхтяжелых ядер галактических космических лучей в палласитах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2022. Vol. 161, № 4.

P. 610–615.

47. Буртебаев Н. et al. Особенности регистрации ускоренных тяжёлых ионов детекторами из фосфатного стекла при различных температурах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2022. Vol. 161, № 4. P. 616–621.
48. Alexandrov A., Vladymyrov M., Tioukov V. LASSO - Large Angle Scanning System for OPERA. 2020. P. <https://zenodo.org/records/4385774>.
49. Arrabito L. et al. Hardware performance of a scanning system for high speed analysis of nuclear emulsions // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 2006. Vol. 568, № 2. P. 578–587.
50. Agafonova N. et al. The detection of neutrino interactions in the emulsion/lead target of the OPERA experiment // J. Instrum. 2009. Vol. 4. P. 06020.
51. Bailey R. et al. The CERN neutrino beam to Gran Sasso (NGS): Addendum to report CERN 98-02, INFN/AE-98/05. 1999.
52. OPERA collaboration. Dataset of tau neutrino interactions recorded by the OPERA experiment // EPJ Web Conf. 2020. Vol. 245, № 08013.
53. Shchedrina T. Scanning OPERA films with using LASSO. 2014.
54. Shchedrina T.V., Di Crescenzo A. Location and Decay Search. 2014.
55. Shchedrina T. et al. Candidate 121230324048. Cross-check in Napoli. 2013.
56. Agafonova N. et al. Observation of a first tau candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam // Phys. Lett. B. 2010. Vol. 691, № 3. P. 138–145.
57. Agafonova N. et al. Discovery of tau Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 115. P. 121802.
58. Agafonova N. et al. Final Results of the OPERA Experiment on ν -tau Appearance in the CNGS Neutrino Beam // Phys. Rev. Lett. 2018. Vol. 120. P. 211801–211807.
59. Polukhina N., Konovalova N., Shchedrina T. The Scattering and Neutrino Detector at the Large Hadron Collider in CERN // Phys. 2023. Vol. 5, № 2. P. 499–507.
60. SND@LHC collaboration, Shchedrina T. SND@LHC: the scattering and neutrino detector at the LHC // JINST. 2022. Vol. 19, № 05. P. 05067.
61. SND@LHC collaboration. SND@LHC Luminosity [Electronic resource] // SND@LHC monitoring. URL: <https://snd-lhc-monitoring.web.cern.ch/luminosity>.
62. Shchedrina T. Status and plans for emulsion production in Russia. 2022. 8th SND@LHC Collaboration meeting p.

63. Shchedrina T. Emulsion production in Russia for 2023. 2023. 14th SND@LHC Collaboration meeting p.
64. Shchedrina T. SLAVICH emulsion data quality. 2023. 15th SND@LHC Collaboration meeting p.
65. SND@LHC collaboration. SND@LHC Emulsion Target [Electronic resource]. 2024. URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/SndLHC/EmuTarget>.
66. Crescenzo A. Di. Neutrino expectations at advanced SND@LHC. 2023. 14th SND@LHC Collaboration meeting p.
67. SND@LHC collaboration. Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications // Proceedings of the Monte Carlo 2000 Conference, Lisbon. 2000.
68. SND@LHC collaboration. New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code // Front. Phys. 2022.
69. Горбунов С.А. et al. Трековая методика в современной физике атомного ядра и элементарных частиц, астрофизике и нанотехнологиях // Успехи Физических Наук. 2024. Vol. 194, № 08. P. 826–852.
70. Кравков С.В. Пётр Петрович Лазарев (К десятилетию со дня смерти) // Успехи Физических Наук. 1952. Vol. 46, № 4. P. 441–449.
71. George E.P. Cosmic Rays Measure Overburden of Tunne // Commonw. Eng. 1955. Vol. 42, № 12. P. 455–457.
72. Armenise N. et al. High-speed particle tracking in nuclear emulsion by last-generation automatic microscopes. // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A. 2005. Vol. 551. P. 261–270.
73. Alexandrov A. et al. The Continuous Motion Technique for a New Generation of Scanning Systems // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. P. 7310.
74. Dedenko L.G. et al. Calculating Vertical Atmospheric Muon Energy Spectra for Energies Ranging from 102 to 105 GeV // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. Vol. 81, № 4. P. 496–499.
75. Петрухин А.А., Богданов А.Г., Кокоулин Р.П. Мюоны космических лучей высоких и сверхвысоких энергий // Физика Элементарных частиц и атомного ядра. 49AD. Vol. 4, № 1124–1147.
76. Petkov V. et al. High energy muon number spectrum detected at the Baksan Underground Scintillation Telescope // Nucl. Phys. B. 2008. Vol. 175–176. P. 362.
77. Tsuji S. et al. Measurements of muons at sea level // J. Phys. G Nucl. Part. Phys. 1998. Vol. 24, № 9.
78. Hof M. et al. MEASUREMENT OF COSMIC-RAY ANTIPROTONS FROM

- 3.7 TO 19 GeV // *Astrophys. J.* 1996. Vol. 467. P. L33–L36.
79. Kremer J. et al. Measurements of Ground-Level Muons at Two Geomagnetic Locations // *Phys. Rev. Lett.* 1999. Vol. 83, № 21.
 80. Codino A. et al. Momentum spectra of atmospheric pions, muons, electrons and positrons at balloon altitudes // *J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* 1994. Vol. 23, № 11.
 81. Briki I., Mazouz M., Ghedira L. Angular distribution of low momentum atmospheric muons at ground level // arXiv:2206.13061v4 [physics.ins-det]. 2023.
 82. Rossi B. *High-Energy Particles* // Prentice-Hall physics series, Prentice-Hall. 1952. 569 p.
 83. Старков Н.И., Земскова С.Г. Методические расчеты по использованию космических мюонов в радиографии // *Краткие сообщения по физике ФИАН.* 2015. Vol. 2.
 84. Alexandrov A.B. et al. A Noninvasive Muonography-Based Method for Exploration of Cultural Heritage Objects // *Phys. Part. Nucl.* 2022. Vol. 53, № 6. P. 1146–1175.
 85. Aleksandrov A.B. et al. Test Experiments on muon radiography with emulsion track detectors in Russia // *Phys.Part.Nucl.Lett.* 2015. Vol. 12, № 5. P. 713–719.
 86. Alexandrov A. et al. Principles of Data Processing of the Muographic Experiment in the Cave Complex of Pskovo-Pechersky Monastery // *Phys.Atom.Nucl.* 2024. Vol. 87, № 6. P. 718–731.
 87. Alexandrov A.B. et al. Muography Experiments in Russia with Emulsion-Based Detectors // *Phys. At. Nucl.* 2024. Vol. 87. P. 305–313.
 88. Alexandrov A.B. et al. Muon radiography method for fundamental and applied research // *Uspekhi Fiz. Nauk.* 2017. Vol. 60, № 12. P. 1277–1293.
 89. Alexandrov A.B. et al. Muon Radiography of Large Natural and Industrial Objects-A New Stage in the Nuclear Emulsion Technique // *J. Exp. Theor. Phys.* 2022. Vol. 134, № 4. P. 506–510.
 90. Konovalova N.S. et al. Exploration of Underground Structures in the Holy Trinity Danilov Monastery by Muon Radiography Method // *Bull.Lebedev Phys.Inst.* 2021. Vol. 48, № 6. P. 175–180.
 91. Abiev A. et al. Muon Radiography Method for Non-Invasive Probing an Archaeological Site in the Naryn-Kala Citadel // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9, № 10. P. 2040.
 92. Abiev A. et al. Muon Radiography Method for Non-Invasive Probing an Archaeological Site in the Naryn-Kala Citadel // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9, № 10. P. 2040.

93. Alexandrov A. et al. Muon Radiography of Large Natural and Industrial Objects-A New Stage in the Nuclear Emulsion Technique // J. Exp. Theor. Phys. 2022. Vol. 134, № 4. P. 506–510.
94. Dmitrieva A.N. et al. Measurements of integral muon intensity at large zenith angles // arXiv:hep-ex/0611051v1. 2006.
95. Фейнберг Е.Л., Котельников К.А., Полухина Н.Г. Полностью автоматизированный измерительный комплекс (ПАВИКОМ) для обработки экспериментального материала трековых детекторов // ЭЧАЯ. 2004. Vol. 35, № 3. P. 763–787.
96. Shchedrina T. FEDRA@ LASSO coupling. 2013.
97. Tioukov V. et al. The FEDRA - Framework for emulsion data reconstruction and analysis in the OPERA experiment // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. Elsevier, 2006. Vol. 559, № 1 SPEC. ISS. P. 103–105.
98. Alexandrov A. et al. A new generation scanning system for the high-speed analysis of nuclear emulsions // JINST. 2016. Vol. 11. P. 06002.
99. Прэйт У. Цифровая обработка изображений. 1982.
100. Vasilev V.T. et al. Neural Networks for Processing Nuclear Emulsions // Phys.Atom.Nucl. 2023. Vol. 86, № 9. P. 2046–2050.
101. Bock R.K. Data analysis techniques for high-energy physics – 2nd edition // Cambridge Univ. Press. 2000.
102. Shchedrina T.V. et al. Results of the Test Experiment on Optimization of the Number of Emulsion Layers in Modern Nuclear Studies with Track Detectors // Bull.Lebedev Phys.Inst. 2022. Vol. 49, № 12. P. 429–435.
103. Starkov N., Zemskova S. Results of the Model Experiment on Cosmic Muon Radiography of a Mountain // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2015. Vol. 42, № 6. P. 157–164.
104. Affum H. et al. Muon Imaging - Present Status and Emerging Applications // INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA. 2022. 116 p.
105. Collaboration G. Geant4 - a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A. 2003. Vol. 506. P. 250–303.
106. Alvarez L. et al. Search for hidden chambers in the pyramids // Science (80-.). 1970. Vol. 167, № 3919. P. 832–839.
107. Nagamine K. et al. Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A (Accelerators, Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 1995. Vol. 356, № 585.

108. Tanaka H. et al. Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A (Accelerators, Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 2003. Vol. 507, № 567. P. 657–669.
109. Ariga T. et al. R&D on nuclear emulsion detectors for muon-radiography of large structures. 2011.
110. Russo A. Investigation of the Unzen and Stromboli volcanoes with nuclear emulsions. 2012.
111. Старков Н.И., Земскова С.Г. Методические замечания по использованию космических мюонов в радиографии // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2015. Vol. 2. P. 11–19.
112. Bogdanova L. et al. Cosmic muon flux at shallow depths underground // Phys. At. Nucl. 2006. Vol. 69, № 8. P. 1293–1298.
113. Shchedrina T. Muon radiography in Russia with emulsion technique. First experiments future perspectives // AIP Conference Proceedings. 2015.
114. Baklagin S. et al. Large Industrial and Natural Objects Investigation by the Muon Radiography on the Basis of Track Detectors // Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol. 2016. Vol. 5, № 7. P. 0507027.
115. Хан-Магомедов С. Дербент. Горная стена. Аулы Табасарана. 1979. 184 р.
116. Кудрявцев А.А. О христианстве в Дербенте // X Крупновские чтения по археологии Сев. Кавказа. 1980.
117. Кудрявцев А.А. Раннехристианская архитектура сасанидского Дербента (V–VI вв.) // Архитектура. Искусство. Археология: проблемы изучения и сохранения культурного наследия. Материалы I Международной научно-практической конференции. 2008.
118. Курбанов Г.М. Зороастризм в средневековом Дагестане. Издательск. 1998. 88–90 р.
119. Groom D.E., Mokhov N.V., Striganov S.I. Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV // Data Nucl. Data Tables. 2001. Vol. 78. P. 183–356.
120. Tioukov V. et al. The FEDRA – Framework for emulsion data reconstruction and analysis in the OPERA experiment // Nucl.Instrum.Meth.A. 2006. Vol. 559, № 1 SPEC. ISS. P. 103–105.
121. Giammanco A. et al. Toward using cosmic rays to image cultural heritage objects // iScience. 2025. Vol. 28, № 3. P. 112094.
122. Alexandrov A. et al. Nuclear Emulsion Detectors for the Muography of Underground Structure of Holy Dormition Pskov-Caves Monastery // Phys. At. Nucl. 2024. Vol. 86, № 6. P. 1095–1100.

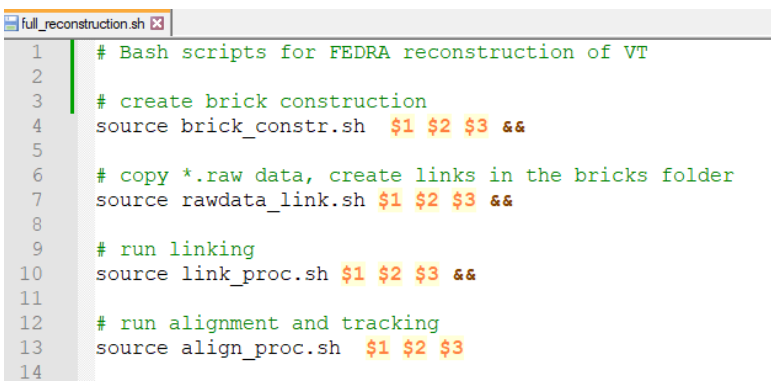
123. Shukla P., Sankrith S. Energy and angular distributions of atmospheric muons at the Earth // Int. J. Mod. Phys. A. 2018. Vol. 33, № 30.
124. Yakovleva E.I., Khomyakov V.A., Khokhlov S.S. Results of measurements of the atmospheric muon flux in the zenith angle range of 85° – 95° // Proceedings, 5th International Youth Scientific School-Conference: Modern Problems of Physics & Technologies : Moscow, Russia. 2016. P. 298–301.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Программное обеспечение для автоматической реконструкции треков

Bash-скрипты с последовательностью команд, которые по очереди считываются и выполняются интерпретатором bash на LINUX сервере для реконструкции ОТ с использованием трех внешних параметров (\$1 – детектор ID, \$2 – ID первой эмульсионной пластины, \$3 – ID последней эмульсионной пластины) и пакета FEDRA:

1. Bash-скрипт, который последовательно запускает все скрипты для реконструкции ОТ с условием успешного выполнения каждого из них (**full_reconstruction.sh**):



```
full_reconstruction.sh x3
1  # Bash scripts for FEDRA reconstruction of VT
2
3  # create brick construction
4  source brick_constr.sh $1 $2 $3 &&
5
6  # copy *.raw data, create links in the bricks folder
7  source rawdata_link.sh $1 $2 $3 &&
8
9  # run linking
10 source link_proc.sh $1 $2 $3 &&
11
12 # run alignment and tracking
13 source align_proc.sh $1 $2 $3
14
```

2. Bash-скрипт, отвечающий за копирование данных сканирования и создание соответствующих ссылок на данные на линукс сервере (**rawdata_link.sh**):

```

rawdata_link.sh
1  #!/bin/bash
2  id=9
3  i=$2
4  ii=$3
5
6
7
8  ### create link for *.raw.root files
9
10 if [ $1 -le $id ]
11 then
12     while [ $i -le $id ] && [ $i -le $ii ]
13     do
14         ln -s /home/emu/b00000$1/p00$i/$1.$i.0.0.raw.root /home/emu/shch/b00000$1/p00$i/$1.$i.0.0.raw.root
15         ((i++))
16     done
17
18     while [ $i -gt $id ] && [ $i -le $ii ]
19     do
20         ln -s /home/emu/b00000$1/p00$i/$1.$i.0.0.raw.root /home/emu/shch/b00000$1/p00$i/$1.$i.0.0.raw.root
21         ((i++))
22     done
23 fi
24
25 #
26 if [ $1 -gt $id ]
27 then
28     while [ $i -le $id ] && [ $i -le $ii ]
29     do
30         ln -s /home/emu/b00000$1/p00$i/$1.$i.0.0.raw.root /home/emu/shch/b00000$1/p00$i/$1.$i.0.0.raw.root
31         ((i++))
32     done
33
34     while [ $i -gt $id ] && [ $i -le $ii ]
35     do
36         ln -s /home/emu/b00000$1/p00$i/$1.$i.0.0.raw.root /home/emu/shch/b00000$1/p00$i/$1.$i.0.0.raw.root
37         ((i++))
38     done
39 fi

```

3. Bash-скрипт, отвечающий за реконструкцию БТ при помощи пакета FERDA и соответствующий ему конфигурационный файл (**link_proc.sh**):

```

link_proc.sh
1
2  makescanset -set=$1.0.0.0 -dzbase=175 -dz=-1350 -from_plate=$2 -to_plate=$3 -reset -v=2
3
4  cp link.pass.rootrc link.rootrc
5  emlink -set=$1.0.0.0 -new -v=2
6

```

```

1 fedra.link.AFID: 1
2 fedra.link.PixelCorr: 0 1. 1.
3 fedra.link.CheckUpDownOffset: 1
4 fedra.link.BinOK: 6
5 fedra.link.NcorrMin: 100
6 fedra.link.DoCorrectShrinkage: 1
7 fedra.link.read.InvertSides: 0
8 #fedra.link.read.HeaderCut: eXview>=55000 && eXview<=60000
9 #fedra.link.read.HeaderCut: eYview>=45000 && eYview<=50000
10 fedra.link.read.HeaderCut: TMath::Abs(eXview - 96000) < 5000 && TMath::Abs(eYview - 50000) < 5000
11 fedra.link.read.UseDensityAsW: 0
12 fedra.link.read.ICUT: -1 -500. 500. -500. 500. -1. 1. -1. 1. 0. 50.
13 fedra.link.RemoveDoublets: 1 5. .1 1
14 fedra.link.DumpDoubletsTree: 0
15 fedra.link.shr.NsigmaEQ: 7.5
16 fedra.link.shr.Shr0: 0.9
17 fedra.link.shr.DShr: 0.3
18 fedra.link.shr.ThetaLimits: 0.0 1.
19 fedra.link.DoCorrectAngles: 1
20 fedra.link.ang.Chi2max: 1.5
21 fedra.link.DoFullLinking: 1
22 fedra.link.full.NsigmaEQ: 5.5
23 fedra.link.full.DR: 30
24 fedra.link.full.DT: 0.1
25 fedra.link.full.CHI2Pmax: 3
26 fedra.link.DoSaveCouples: 1
27 fedra.link.Sigma0: 1 1 0.013 0.013
28 fedra.link.PulsRamp0: 6 9
29 fedra.link.PulsRamp04: 6 9
30 fedra.link.Degrad: 5
31 fedra.link.LLfunction: 0.256336-0.16489*x+2.11098*x*x
32 fedra.link.CPRankingAlg: 0
33 emlink.outdir: ..
34 emlink.env: link.rootrc
35 emlink.EdbDebugLevel: 1
36

```

4. Bash-скрипт, отвечающий за переход в единую систему координат всех эмульсионных пластин и реконструкцию ОТ при помощи пакета FERDA и соответствующие ему конфигурационные файлы:

```

1 makescanset -set=$1.0.0.0 -dzbase=170 -dz=-450 -from_plate=$2 -to_plate=$3 -v=2
2 cp align.pass1.rootrc align.rootrc
3 emalign -set=$1.0.0.0 -new -v=2
4
5
6 makescanset -set=$1.0.0.0 -dzbase=170 -dz=-450 -from_plate=$2 -to_plate=$3
7 cp align.pass2.rootrc align.rootrc
8 emalign -set=$1.0.0.0 -new -v=2
9
10 makescanset -set=$1.0.0.0 -dzbase=170 -dz=-450 -from_plate=$2 -to_plate=$3
11 cp align.pass3.rootrc align.rootrc
12 emalign -set=$1.0.0.0 -new -v=2
13
14 makescanset -set=$1.0.0.0 -dzbase=170 -dz=-450 -from_plate=$2 -to_plate=$3
15
16 cp track.pass.rootrc track.rootrc
17 emtra -set=$1.0.0.0 -new -v=2
18

```

```

1 fedra.align.OffsetMax: 5000
2 fedra.align.DZ: 0
3 fedra.align.DPHI: 0.05
4 fedra.align.SigmaR: 80
5 fedra.align.SigmaT: 0.04
6 fedra.align.DoFine: 1
7 fedra.readCPcut: eCHI2P<2.0&&s.eW>10&&eN1==1&&eN2==1&&s.Theta()<0.1
8 fedra.align.SaveCouples: 1
9 emalign.outdir: ..
10 emalign.env: align.rootrc
11 emalign.EdbDebugLevel: 1
12

```

```

align_pass2.rootc
1 fedra.align.OffsetMax: 1000
2 fedra.align.DZ: 100
3 fedra.align.DPHI: 0.05
4 fedra.align.SigmaR: 30
5 fedra.align.SigmaT: 0.03
6 fedra.align.DoFine: 1
7 fedra.readCPcut: eCHI2P<2.1&&s.eW>10&&eN1==1&&eN2==1&&s.Theta() $<0.5$ 
8 fedra.align.SaveCouples: 1
9 emalign.outdir: ..
10 emalign.env: align.rootrc
11 emalign.EdbDebugLevel: 1
12

```

```

align_pass3.rootc
1 fedra.align.OffsetMax: 100
2 fedra.align.DZ: 50
3 fedra.align.DPHI: 0.02
4 fedra.align.SigmaR: 20
5 fedra.align.SigmaT: 0.03
6 fedra.align.DoFine: 1
7 fedra.readCPcut: eCHI2P<2.1&&s.eW>10&&eN1==1&&eN2==1
8 fedra.align.SaveCouples: 1
9 emalign.outdir: ..
10 emalign.env: align.rootrc
11 emalign.EdbDebugLevel: 1
12
13

```

```

track_pass.rootc
1 fedra.readCPcut: eCHI2P<2.4&&s.eW>20&&eN1==1&&eN2==1&&s1.eFlag>0&&s2.eFlag>0
2 fedra.track.TrZmap: 3800 0 190000 3800 0 190000 30
3 fedra.track.npass: 1
4 fedra.track.minPlate: -999
5 fedra.track.maxPlate: 999
6 fedra.track.refPlate: 999
7 fedra.track.nsegmin: 2
8 fedra.track.ngapmax: 2
9 fedra.track.DZGapMax: 4200
10 fedra.track.DRmax: 60
11 fedra.track.DTmax: 0.07
12 fedra.track.Sigma0: 4 4 0.005 0.005
13 fedra.track.PulsRamp0: 15 20
14 fedra.track.PulsRamp04: 15 20
15 fedra.track.Degrad: 4
16 fedra.track.probmin: 0.001
17 fedra.track.momentum: 1
18 fedra.track.mass: 0.14
19 fedra.track.do_use_mcs: 0
20 fedra.track.RadX0: 50810
21 fedra.track.erase: 0
22 fedra.track.do_realign: 0
23 fedra.track.do_misalign: 0
24 fedra.track.misalign_offset: 500
25 fedra.track.do_local_corr: 1
26 fedra.track.do_comb: 0
27 fedra.track.NsegMin: 2
28 emtra.outdir: ..
29 emtra.env: track.rootrc
30 emtra.EdbDebugLevel: 1

```