

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 мюнографии объектов культурного наследия**

специальность 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва, 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Официальные оппоненты:

Мухамедшин Рауф Агдамович

доктор физико-математических наук,
в.н.с., заведующий Лабораторией Нейтринной Астрофизики
Институт ядерных исследований РАН, г. Москва.

Цукерман Илья Ильич

доктор физико-математических наук,
с.н.с. лаборатории нейтринной физики Курчатовского комплекса
теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт»,
г. Москва.

Яшин Игорь Иванович

доктор физико-математических наук, профессор,
Научно-образовательный центр НЕВОД института ядерной физики и
технологий НИЯУ МИФИ, г. Москва.

Ведущая организация:

Международная межправительственная научно-исследовательская организация
Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна,
Московская область.

Защита состоится « 12 » ноября 2025 года в 12:00 на заседании диссертационного
совета номер 24.1.262.03 на базе ФИАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский
проспект, д. 53.

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

Автореферат разослан « » _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
номер 24.1.262.03 доктор физ.- мат. наук _____ С.П. Баранов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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 мюонографии. 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.

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 и обратного рассеяния 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 мюонографических 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 Федерико 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 мюонографических 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 мюонографических работ.

Проведённые эксперименты убедительно демонстрируют, 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. Мюонография 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.

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 [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 [11]), что также отражено как его соавторство в статье [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 (IC-CMSE 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), МЕРФИ, Moscow, “Application of the muon radiography method to study the structure of massive objects”, October 2^d – 5th, 2017.
 3. IS CRA 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.
- 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, опубликованных в рецензируемых журналах. Полный список этих статей приведен в конце автореферата.

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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** приведено обоснование актуальности исследований, сформулирована цель работы, научная новизна работы, достоверность и практическая значимость, приведен личный вклад автора, основные положения, выносимые на защиту, список публикаций по теме диссертации, дан список конференций и семинаров, на которых состоялась апробация работы.

В **главе 1** описан процесс восстановления производства фотографической эмульсии в России. Дан краткий исторический обзор производства и использования ядерной фотоэмульсии (ЯФ) от пионерских работ Беккереля и последующего развития эмульсионной технологии под руководством Пауэлла (производ-

ство Ильфорд и Кодак) [12], различных технологий изготовления и процесса проявки ядерных фотоэмульсий (ЯФ) [13–16] до современных экспериментов, использующих десятки и даже сотни тысяч квадратных метров ядерной фотоэмульсии [17–19], реализация которых стала возможной благодаря развитию производства прецизионной и вычислительной техники и автоматических сканирующих оптических микроскопов.

Детально описана методология восстановления ЯФ российского производителя, комплекс реализованных разработок при непосредственном и определяющем вкладе автора работы.

Представлена информация о двух производителях ЯФ в настоящее время: университет Нагойя, Япония и ООО “Славич”, Переславль-Залесский, Россия; характеристики выпускаемой продукции, производственные мощности и потребители.

Приведено подробное описание разработанной автором методики визуального и микроскопического контроля ЯФ.

В ходе выполнения работы анализировались изменения свойств ЯФ с течением времени по результатам авторского уникального эксперимента по старению ЯФ в различных условиях – в термокамере (ускоренное старение) и в естественных условиях (естественное старение). Результаты ускоренного старения в термокамере показали, что в первые 3-4 месяца ускоренного старения ЯФ демонстрирует стабильность основных свойств, заявленную производителем, в период от 4 месяцев до года наблюдается небольшой рост объемной вуали (число проявленных зерен в 10^3 мкм³) $\sim 20 \div 25$ % от первоначального. Результаты эксперимента по естественному старению представлены на рис. 1 и 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: менее 8 зерен на 1000 мкм³.

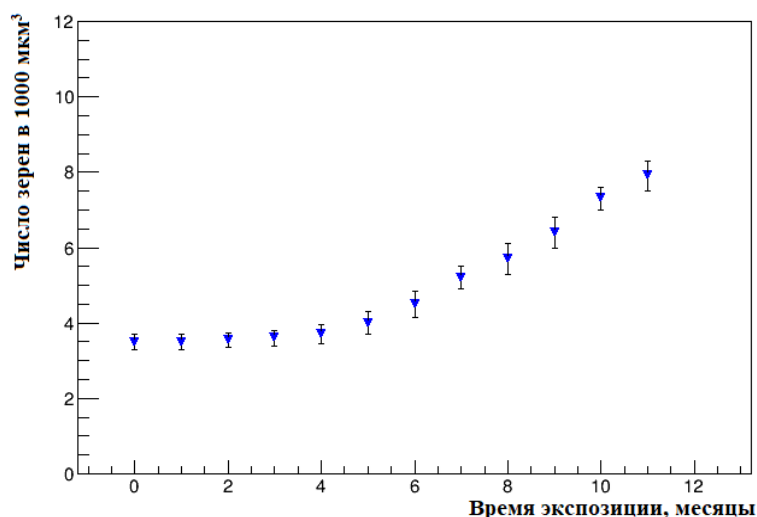


Рисунок 1. Число проявленных зерен ЯФ в единице объема с течением времени.

В эксперименте по естественному старению была также осуществлена оценка регрессии треков, согласно результатам которой регрессия треков, связанная с эффектом старения эмульсии, не наблюдается в первые 6 месяцев, а в период 7÷11 месяцев не превышает 10% [20].

Далее приводится описание процедуры “рефрешинга” (уничтожения фона, набранного при длительном хранении эмульсии от момента ее производства) для ЯФ российского производителя. По результатам тестового эксперимента, проведенного автором в лаборатории Гран Сассо, Италия, была дополнительно выполнена оценка 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 с целью подобрать наиболее оптимальные параметры для максимального “рефрешинга” без потери чувствительности эмульсионных слоев при регистрации однозарядных частиц. На рисунке 2 представлены фото одного поля зрения при различных условиях проведения эксперимента. Из данных, представленных на рис. 2, отчетливо видно, что при $H=95\%$ (влажность), $T=28^{\circ}\text{C}$ на образце ЯФ следы от фоновых взаимодействий минимальны.



а)

б)

в)

Рисунок 2. 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.

Результатом стали подобранные эмпирическим путем параметры для “рефрешинг” процедуры ЯФ российского производства для экспериментов с регистрацией однозарядных частиц, прежде всего, в фундаментальных исследованиях на ускорителях с минимальной потерей эффективности фотоэмульсионного слоя.

Глава 2 посвящена фундаментальным исследованиям с использованием ЯФ на базе обработки данных на комплексе ПАВИКОМ. Приведено описание Полностью АВтоматизированного Измерительного КОМПлекса (ПАВИКОМ), состоящего из трёх независимых установок: ПАВИКОМ-1, ПАВИКОМ-2 и ПАВИКОМ-3 [21,22], где осуществляется обработка и анализ экспериментальных данных целого ряда российских и международных экспериментов [23–25].

Кратко представлена информация об эксперименте OPERA – его основные задачи, структура детектора, результаты сканирования и физического анализа событий, выполненных на комплексе ПАВИКОМ. OPERA был первым экспериментом «на появление» - по прямой регистрации появления тау-нейтрино ν_τ в пучке мюонных нейтрино ν_μ . Детектор эксперимента OPERA располагался в подземной лаборатории LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Италия) на глубине около ~ 3100 м в.э. на расстоянии 730 км от источника пучка мюонных нейтрино со средней энергией 17 ГэВ из ЦЕРН, для генерации которого использовался комплекс CNGS (“CERN Neutrinos to Gran Sasso”) [26]. 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 .

Общая площадь смонтированных в мишенных модулях эмульсионных пленок составила 110000 м^2 , а за всё время эксперимента в подземной лаборатории LNGS методом роботизированной сборки было изготовлено около 150000 кирпичей с использованием более девяти миллионов эмульсионных пленок, сканирование которых производилось в десятках лабораторий на территории 13 стран участниц эксперимента, в том числе, в единственной в России Лаборатории элементарных частиц ФИАН при непосредственном участии автора работы [27,28]. Все отсканированные в ФИАН эмульсионные данные занесены в единую базу данных эксперимента OPERA [29]. Если в одной из лабораторий, участвующих в сканировании и обработке, обнаруживали кандидата на распад τ - лептона, эмульсии отправляли на независимое перекрестное сканирование в другую лабораторию. Пример такого перекрестного сканирования и физического анализа в лаборатории университета Федерико II и сканирующей лаборатории ЛЭЧ ФИАН были доложены автором работы на одном из совещаний в составе международной коллаборации OPERA [30].

Первый кандидат на тау-нейтрино был зарегистрирован в 2010 г [31], проведенный кинематический анализ показал, что наблюдаемый распад соответствует каналу $\tau \rightarrow \nu_\tau$, за которым следует распад $\rho \rightarrow \pi^0 \pi$. В период с 2012 по 2015 год были зарегистрированы ещё 4 события с ν_τ [32]. Регистрация 5 событий - осцилляций мюонных нейтрино в тау-нейтрино в эксперименте OPERA на уровне достоверности более 5 стандартных отклонений 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 тау-нейтрино со статистической значимостью $6,1\sigma$ на основе наблюдения десяти ν_τ событий стало главным результатом эксперимента [33]. Данные эксперимента опубликованы на портале открытых данных ЦЕРН.

В настоящее время сотрудники ЛЭЧ ФИАН работают в составе международной коллаборации эксперимента SND@LHC в ЦЕРН (Scattering Neutrino Detector at LHC), в которую мы вошли со дня подготовки предложения о проекте

[34]. Это компактный автономный эксперимент для регистрации всех трех ароматов нейтрино 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 экспериментальных результатов. Установка расположена в туннеле T118 БАК, в 480 м от точки IP1 столкновения встречных пучков протонов в детекторе АТЛАС. Детектор 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 очарованных частиц. 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, см. рис. 3, был спроектирован таким образом, чтобы при ограниченных размерах обеспечить достаточное количество вещества для измерения энергии частиц в калориметре и высокую эффективность идентификации мюонов, при этом поперечный размер мишени подобран таким образом, чтобы регистрировать частицы в необходимом интервале псевдобыстрот.

Алгоритм реконструкции событий в ядерных эмульсиях эксперимента SND@LHC идеологически аналогичен разработанному для эксперимента OPERA, однако плотность треков на единицу площади SND@LHC эксперимента на порядки превышает плотность треков в эмульсионном детекторе эксперимента OPERA, что потребовало существенной модернизации алгоритма как для реконструкции треков, так и для поиска вершин взаимодействия. На рисунке 4 показан пример реконструкции треков и вершин взаимодействий эмульсионного детектора сеанса RUN1 эксперимента SND@LHC. Так, рис. 4а демонстрирует плотность треков на площади 1 см^2 сеанса облучения RUN1, а на рис. 4б представлены вершины трех взаимодействий, реконструированных в данном объеме, одно из которых (Event 1) не имеет первичного трека, по предварительным результатам, взаимодействие нейтрино.

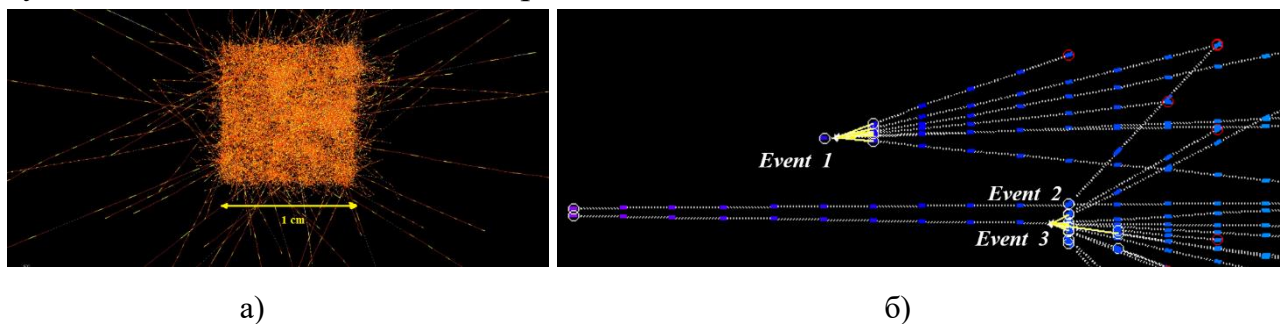


Рисунок 4. Результат реконструкции одного из кирпичей RUN1: а) всех ОТ(объемных треков), пересекающих 1 см^2 ; б) вершин взаимодействий на 1 см^2 , удовлетворяющих критериям отбора топологии событий.

В настоящее время выполнено 15 экспозиций. Первая экспозиция (RUN0) проводилась с целью тестирования конструкции и качества сборки нейтринного детектора, и поэтому имела самую маленькую загрузку $0,5\text{ фб}^{-1}$. Со второй по шестую экспозиции мишень облучалась в полной сборке: 5 стенок по 4 кирпича, содержащих по 60 эмульсионных слоев, что составляет 1200 эмульсий за один сеанс, а во всех последующих сеансах мишень наполнялась наполовину ввиду большой интегральной светимости на пучке ускорителя, но с более частой заменой. Начиная с третьей экспозиции, нейтринный детектор регистрировал данные синхронно с электронными детекторами.

Производство ядерной фотоэмульсии для наполнения мишени нейтринного детектора обеспечивается двумя производителями: Университет Нагойя, Япония и ООО “Славич”, г. Переславль-Залесский, Россия. Мониторинг качества российской эмульсии перед отправкой в ЦЕРН проводился автором работы [36–38].

На данный момент эксперимент SND@LHC находится в стадии активного набора данных, технические характеристики каждого из сеансов облучения: наполнение нейтринного детектора эмульсионными слоями, временные интервалы сеансов облучения, масса мишени, интегральная светимость представлены в [39]. Часть сеансов: RUN1, RUN3, RUN5-RUN14 имеют набранную интегральную светимость $\sim 10 \text{ фб}^{-1}$, что соответствует $\sim 10^4 \div 10^5$ треков/см², а для сеансов RUN2, RUN4 интегральная светимость $\sim 20 \div 30 \text{ фб}^{-1}$ и заполнение эмульсии достигает в этом случае $\sim 10^5 \div 10^6$ треков/см², 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.

Опубликованы первые результаты эксперимента SND@LHC, полученные в 2022 г [40,41], 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 [42].

Глава 3 посвящена детальному описанию методики мюнографических экспериментов на основе эмульсионных детекторов.

Представлены основные характеристики потоков атмосферных мюонов: энергетический спектр, зависимость потока мюонов от зенитного угла, основные источники потери энергии для мюонов в различных диапазонах энергий, исследования и свойства околоразрывных потоков мюонов [43,44].

Подробно описана процедура реконструкции треков с использованием фотоэмульсии в качестве трекового детектора. При сканировании и реконструкции треков на установке ПАВИКОМ используются два программных пакета. Первый из них, PAVICOM, разработан в Лаборатории элементарных частиц ФИАН, одним из разработчиков которого является автор [44,45], с его помощью 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 [46], был создан для обработки данных эксперимента OPERA, в котором автор, как член этой международной коллаборации, участвовал в отладке программного пакета для анализа эмульсионных данных. 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.

Программное обеспечение ПАВИКОМ максимально гибкое, 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, что позволяет 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.

Представлен разработанный и реализованный автором работы эксперимент, задачей которого была оценка минимального количества пластин, необходимого для реконструкции треков в мюнографических экспериментах. Тестовый эксперимент проводился в ФИАН, детектор располагался в комнате на первом этаже главного здания и состоял из 10 двухсторонних эмульсионных пластин размером $10 \times 12,5$ см, см. рис.5.



Рисунок 5. а) схема проведения эксперимента (получена GooglePro Earth), б) фото установки детектора на экспозиции в лаборатории ФИАН.

Время экспозиции атмосферными мюонами составило один месяц. Моделирование прохождения мюонов через эмульсионный детектор выполнено с помощью пакета Geant4. При моделировании заложены технические характеристики здания, где находился детектор (структура помещений ФИАН, толщина стен, крыша, колонны, плотность материала и т.п.). Впервые в России в автоматическом режиме сканирование и реконструкция треков в ядерной фотоэмульсии проводилось в диапазоне углов до 75° . Треки были реконструированы в наборах из 4, 6, 8 и 10 идущих подряд пластин. Результаты двумерных угловых распределений модельных расчетов и экспериментальных результатов с максимальным и минимальным числом пластин, участвующих в реконструкции трека представлены на рисунке 6. При анализе данных моделирования в реконструкции участвовали только те треки, которые пересекли весь объем 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 (меняется от 0 до 75 градусов, ограничения сканирующей системы), φ - азимутальный угол (меняется от 0 до 360 градусов).

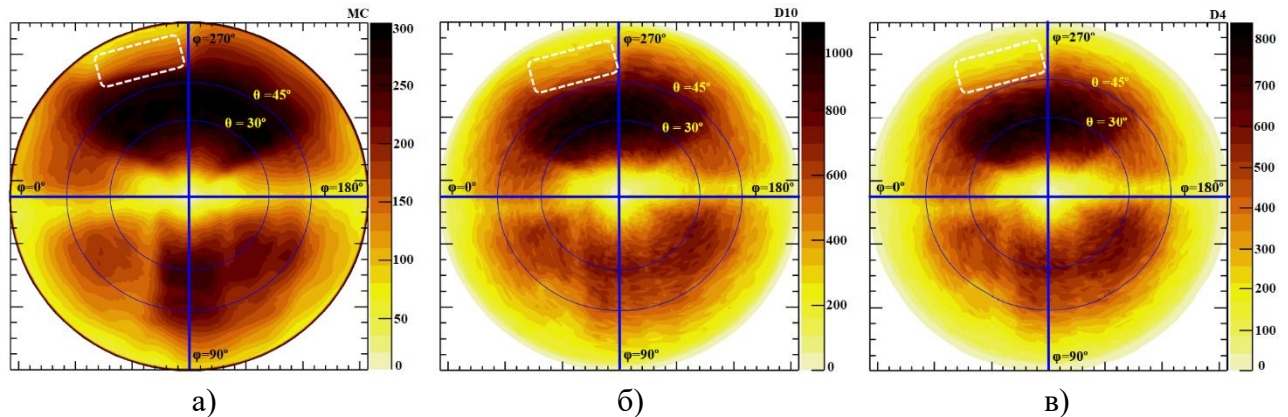


Рисунок 6. а) угловое распределение треков по результатам модельных расчетов с помощью пакета Geant4; экспериментальные результаты детектора, состоящего из б) 10-ти фотоэмульсионных пластин, в) 4-х фотоэмульсионных пластин; цветовая шкала отражает поток мюонов в заданном диапазоне углов.

Большой поток мюонов в верхней полусфере в диапазоне углов $\varphi=(180^0\div360^0)$, $\theta=(20^0\div45^0)$ 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 $\varphi=(10^0\div70^0)$ и $\varphi=(70^0\div170^0)$ отвечает положению детектора в здании ФИАН, слева от места установки детектора крыло здания ФИАН намного длиннее (см. рис.5 фото GooglePro Earth). Уменьшение потока мюонов при прохождении через «Здание 1» соответствует интервалу углов $\varphi=(270^0\div310^0)$ и $\theta=(40^0\div60^0)$, для удобства отмечено белой пунктирной линией на рис. 6.

Для сборок детектора с меньшим числом пластин провал в области углов, отвечающих геометрии и местоположению "Здания 1", также присутствует, однако становится более размытым по причине уменьшения статистики, т.е. при работе с большими углами сканирования θ до 75° необходимо большее число пластин. Анализ экспериментальных результатов показал, что для исследования объектов, находящихся под большими углами к детектору ($45^\circ < \theta < 75^\circ$), необходимо минимум шесть фотоэмульсионных пластин, в то время как для объектов, располагающихся под малыми углами ($\theta < 45^\circ$) - достаточно четырех эмульсионных пластин [47].

В главе 4 представлены результаты мюонографических исследований от первых в России тестовых экспериментов, в результате которых были выработаны оптимальные условия постановки экспериментов, алгоритмы обработки полученных данных, изучены особенности метода, до проведения полномасштабных экспериментов исследования внутренней структуры объектов культурного наследия.

Объектом первого тестового мюонографического эксперимента стала стальная колонна весом 23 тонны (ядро магнита циклотрона НИИЯФ МГУ), которая играла роль массивного поглотителя мюонов космических лучей и создавала "тень" в потоке этих частиц [48]. 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. Время экспозиции детекторов составило 49 дней. На рисунке 7 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 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.

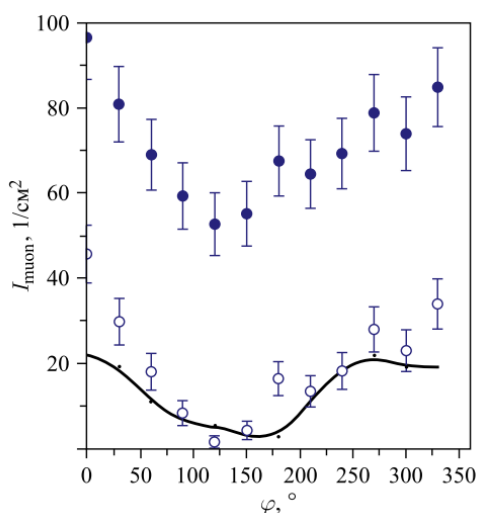


Рисунок 7. Угловые распределения потоков мюонов при разных азимутальных углах φ и фиксированном диапазоне зенитных углов θ , полученные в результате первого тестового эксперимента, в сравнении с результатами модельных расчетов: сплошная кривая – расчет, заштрихованные кружки – результат эксперимента без вычета фона, незаштрихованные кружки – результат эксперимента с вычетом фона.

Результаты расчетов угловых распределений потоков мюонов при прохождении через стальную колонну приведены на рисунке 7 в виде сплошной кривой.

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. Детектор, установленный вне массивной колонны, был использован для оценки полного потока мюонов на уровне колонны. Экспериментально полученные угловые распределения, представленные на рисунке 7, наглядно демонстрируют ослабление потока мюонов, обусловленное их поглощением при прохождении через массивное тело колонны и находятся в полном соответствии с предсказаниями модельных расчетов.

Второй тестовый эксперимент был проведен на территории НИИ шинной промышленности, г. Москва. Объектом наблюдения были диски бегового барабана - инерционного элемента испытательного стенда общим весом 40 тонн и диаметром ≈ 3 метра каждый [49]. 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 $tx:ty$, см. рис.8, наложена координатная сетка (θ, φ) , (θ –круги, φ - лучи, выходящие из начала координат) в соответствии с соотношениями $tg(\varphi) = \frac{ty}{tx}$ и $tg^2\theta = tx^2 + ty^2$.

Модельные расчеты выполнены с помощью пакета Geant4 с учетом формы и материала исследуемого объекта. Приведенное на рисунке двумерное угловое распределение для детектора 1 наглядно демонстрирует “тень” от бегового барабана испытательного стенда (рис.8а) и находится в хорошем соответствии с модельными расчетами (рис.8б).

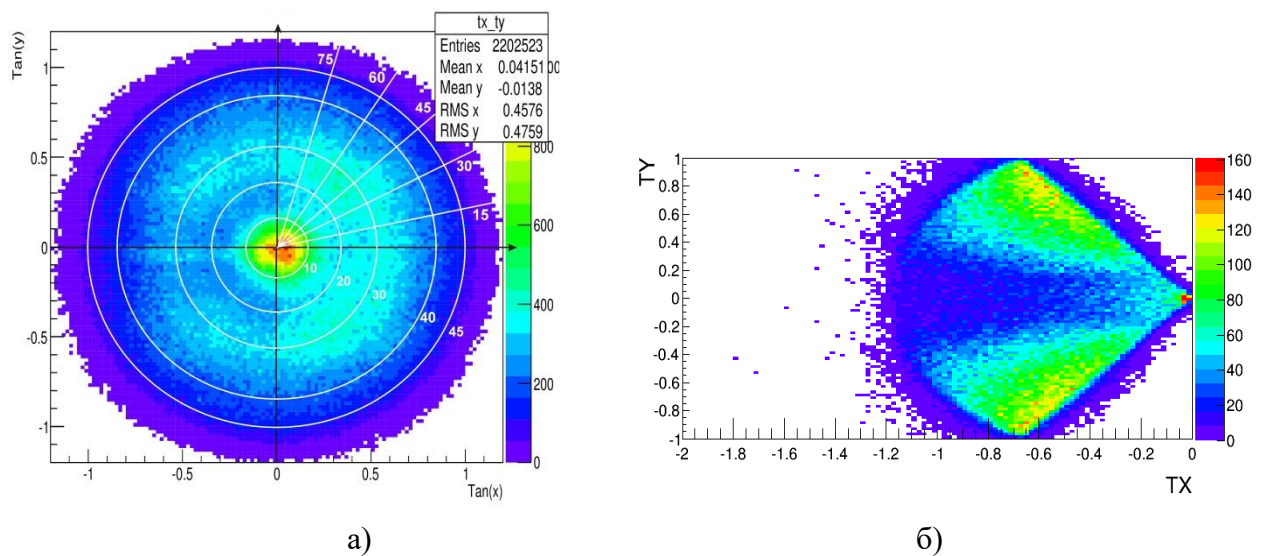


Рисунок 8. Угловые распределения мюонов после прохождения дисков беговых барабанов испытательного стенда: а) экспериментальные распределения, полученные в ядерной эмульсии детектора 1; б) результаты модельных расчетов, цветовая шкала отражает поток мюонов в заданном диапазоне углов.

Первый в России полномасштабный мюонографический эксперимент с использованием эмульсионных детекторов был успешно выполнен в шахте Геофизической службы РАН, г. Обнинск [49]. 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. Детекторы с фотоэмульсионными слоями были установлены в шахте на глубине 30 м в ближайшей к лифту комнате. В соответствии с конструкцией помещений, диапазон углов, в котором должен наблюдаться “сигнал” от шахты лифта $\theta \sim 25^\circ$, φ

$\sim 135^\circ$. Четыре детектора, подготовленные для испытаний, представляли собой плотно упакованные стопки из десяти полных с двух сторон эмульсионных пластин площадью $10 \times 12,5 \text{ см}^2$ (каждый), жестко закрепленных в каркасах из алюминиевых пластин; использовалась та же конструкция, что и в тестовых экспериментах. Время экспозиции детекторов составило 2 и 4 месяца, анализ данных показал, что время экспозиции в 2 месяца статистически недостаточно, поэтому основные экспериментальные результаты были извлечены из двух детекторов, экспозиция которых составила 4 месяца. Для минимизации комбинаторного фона при реконструкции ОТ, использовались только те треки, 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).

При планировании эксперимента были сделаны оценки потоков мюонов в месте расположения детектора с разных направлений. При выполнении расчетов 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 [43] была взята вертикальная составляющая потока космических мюонов, которая была дополнена зависимостью от угла θ в виде $F(\theta) \sim \cos(\theta)^2$. Чтобы получить приближенный к реалистичному спектр, треки мюонов, сгенерированных на поверхности, были продлены в слое грунта ($\rho = 1,5 \div 3,3 \text{ г/см}^3$) на глубину 30 м с помощью пакета GEANT4. Так как в данной экспозиции была частично использована эмульсия, произведенная для эксперимента OPERA с большим сроком хранения, то была учтена невысокая эффективность реконструкции треков ввиду эффекта “старения” фотоэмульсионных слоев. Экспериментальные результаты с учетом всех вышеописанных поправок, а также результаты симуляции с помощью пакета GEANT4 представлены на рисунке 9 а, б соответственно.

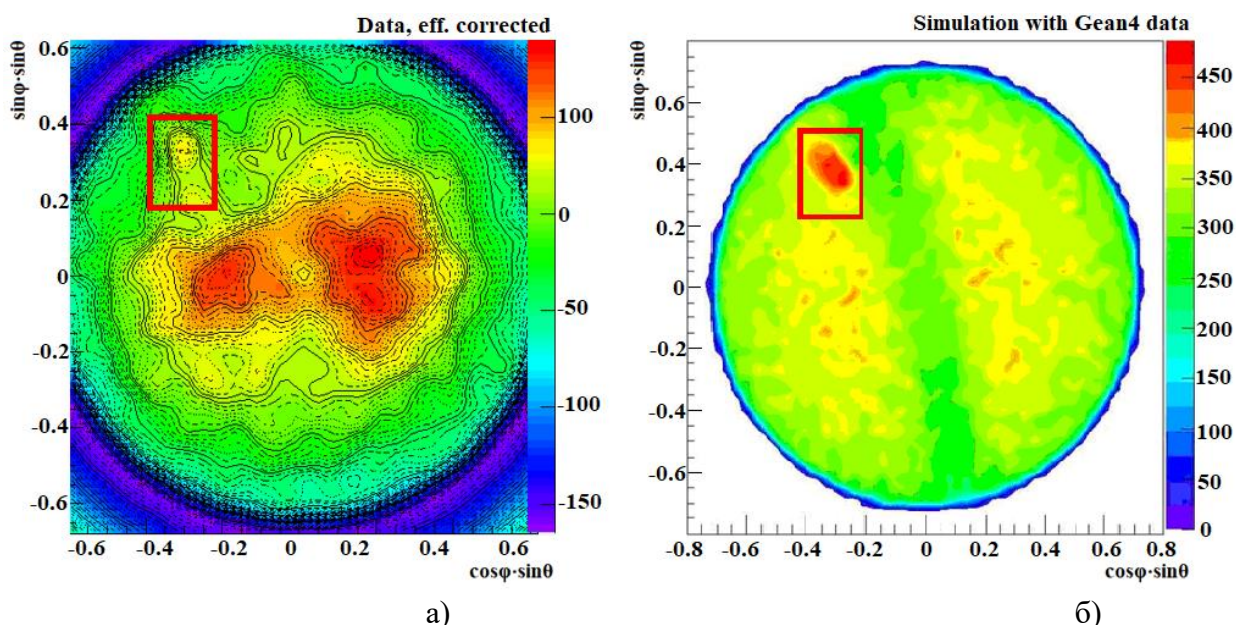


Рисунок 9. Распределение количества космических мюонов в системе координат $\cos\varphi \cdot \sin\theta : \sin\varphi \cdot \sin\theta$ в шахте на глубине 30 метров, рамкой отмечено положение шахты лифта: а) экспериментальное распределение потока мюонов с учетом эффективности реконструкции треков и за вычетом фоновое распределение потока мюонов; б) усреднённое по азимутальному углу φ фоновое, сгенерированное в пакете GEANT4; цветовая шкала отражает поток мюонов в заданном диапазоне углов.

На обоих распределениях, представленных на рисунке 9 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 [49].

Проведена серия мюонографических экспериментов по исследованию памятников культурного наследия России, первым из которых стала работа в архитектурном комплексе цитадели Нарын-Кала (г. Дербент, Дагестан), являющимся объектом всемирного наследия ЮНЕСКО [50]. 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. Объектом исследования стало сложенное из камня незаполненное грунтом крестово-купольное сооруже-

ние, 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.

Подземное крестово-купольное сооружение строго ориентировано по сторонам света. Здание построено из камня-ракушечника, имеет высоту («глубину») около 11 метров, центральное пространство перекрыто проволочным ограждением купола диаметром 5 м. Сооружение почти полностью скрыто культурным слоем толщиной около 7,5 м; на современной поверхности видны лишь фрагмент полуразрушенного купола, 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. 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 схематично показано на рисунке 10 б. В эксперименте использовалась двусторонняя ядерная эмульсия размером 10×12.5 см² из эксперимента OPERA. Конструкция детектора для данного эксперимента представляла из себя металлическую панель размером 43 см $\times$ 52 см, на которой жестким образом были закреплены 9 стопок фотоэмульсий (пять эмульсионных слоев в каждой стопке), упакованных в специальные свето- и водонепроницаемые пакеты. После сборки и упаковки, детекторы были закреплены на специальные подставки, обеспечивающие неподвижность всей конструкции, и установлены на место экспозиции. Моделирование прохождения потока мюонов для эксперимента проводилось с

учетом конструкции и материала стен сооружения на основе программного пакета GEANT4. 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 и различной толщиной стен, т.к. материал стен сооружения и их толщина точно неизвестны. Исходные импульсы мюонов были разыграны согласно экспериментально полученному распределению [43], зависимость от зенитного угла θ была аппроксимирована функцией $F(\theta) \sim \cos^2(\theta)$, для азимутального угла φ использовалось равномерное распределение. Рисунок 10а демонстрирует экспериментальные результаты для детектора, который был расположен в центре здания (отмечено красной рамкой), на рис 10б показано расположение детекторов при экспозиции.

Данные, представленные на рис. 10а наглядно демонстрируют крестообразную структуру исследуемого помещения. Из сравнения полученного экспериментального распределения с расчетным можно заключить, что приведенный результат наиболее близок к варианту моделирования с параметрами стен $L=1,5 \text{ м}$ и $\rho=2,65 \text{ г/см}^3$, где L - толщина стен, а ρ - их плотность. Полученные данные позволили определить геометрические размеры и плотность стен постройки [50].

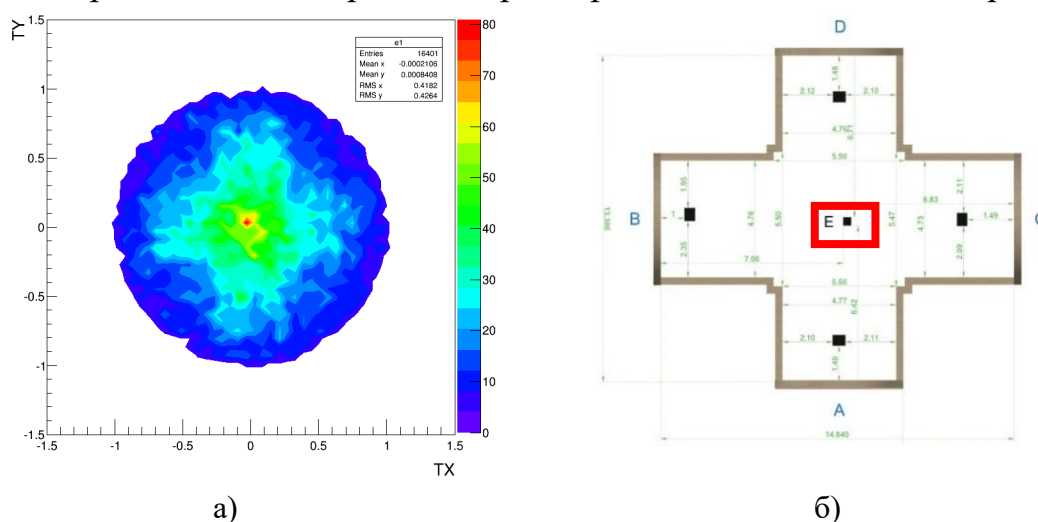


Рисунок 10. а) экспериментальное распределение потока мюонов для детектора, расположенного в центре здания (отмечено красной рамкой, на рис. 10б); б) - схема расположением детекторов (вид сверху).

Обнаружение особенностей структуры археологического объекта и основных физических характеристиках стен здания позволяют планировать последующие экспозиции для построения томограммы 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.

Эксперимент по изучению скрытой структуры зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря, г. Переславль-Залесский, стал вторым полномасштабным экспериментом по изучению объектов культурного наследия методом мюнографии [51]. Предметом изучения в данном эксперименте стали здания Церкви Похвалы Божьей Матери (ЦПБМ) и Церкви Всех Святых (ЦВС), а также территория между ними.

Для данного эксперимента была разработана новая конструкция детекторов, обеспечивающая жесткую фиксацию эмульсионных слоев в вертикальном положении, а регулируемые ножки детектора давали возможность выравнивать положение детектора по уровню. Форма опорной площадки детектора позволяла однозначно ориентировать детектор в направлении «вперёд-назад» по отношению к исследуемой области. Детекторы были установлены таким образом, чтобы углы обзора соседних детекторов пересекались. Для привязки пространственного положения установленных детекторов к единой системе координат была проведена лидарная съемка, что позволило также создать цифровую 3D-модель видимой части исследуемых объектов. В эксперименте использована эмульсия российской компании 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, время экспозиции составило ~ 3 месяцев.

Моделирование проводилось для всех задействованных в эксперименте детекторов с учётом технических характеристик плана БТИ подвального помещения и первого этажа, а также окружающего грунта.

На рисунке 11 представлены данные, отражают оригинальную идеологию одного из первых этапов анализа данных мюнографического эксперимента - проверку достоверности получаемых результатов, алгоритм которой был разработан аспирантом нашей группы Ж.Т. Садыковым (см. рукопись подготовленной к защите диссертации [11]), нашим соавтором статьи [10].

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.

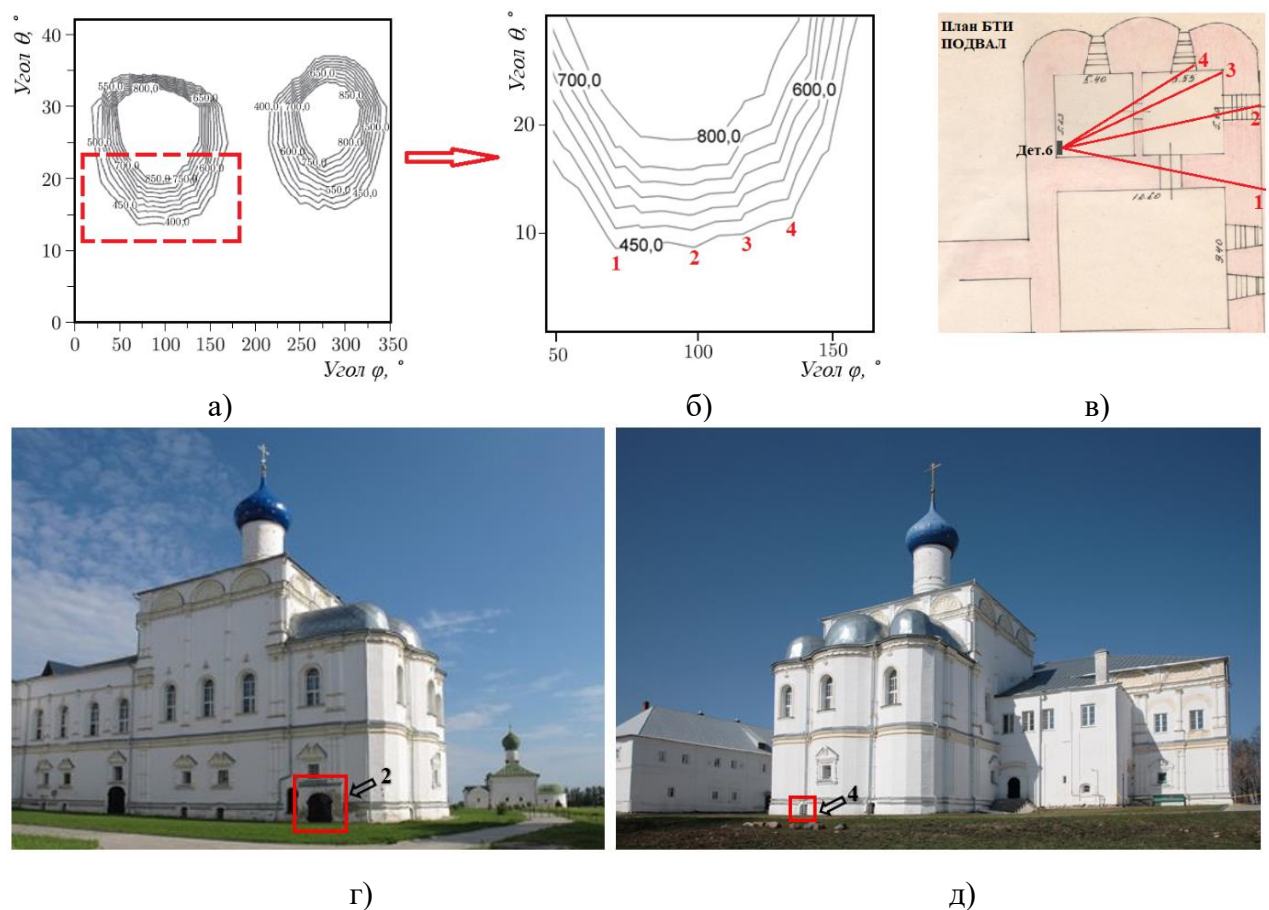


Рисунок 11. а) распределение числа мюонов по углам φ и θ в виде линий уровня по направлению зоны видимости детектора «вперёд» $180^\circ < \varphi \leq 360^\circ$ и «назад» ($0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$); б) увеличенная часть распределения линий уровня, для детектора 6 в направлении «назад»; 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 на рис. 11б; г, д) фото зарегистрированных видимых объектов, отмеченных на гистограмме цифрами 2 и 4.

Экспериментальные результаты, достоверность которых была подтверждена описанным методом для видимых архитектурных элементов, дали основание использовать авторскую методику для исследования недоступных областей, таких как скрытые части подвалов, неизвестные захоронения, исторические фундаменты и т.д. Для определения пространственного положения неизвестных ранее структурных особенностей были рассмотрены попарные пересечения секторов обзора детекторов. Так на рисунке 12а представлен ряд зарегистрированных особенностей в зоне пересечения лучей детекторов 2, 4, 5 и 6, находящихся под землёй между зданиями ЦПБМ и ЦВС.

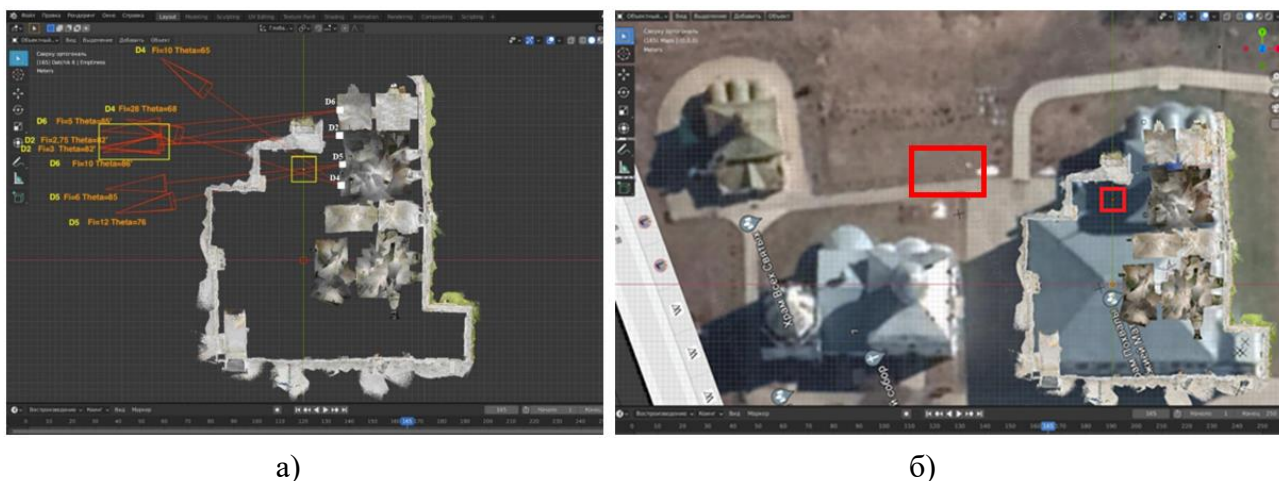


Рисунок 12. а) лидарная съемка видимых границ помещения в местах экспозиции детекторов, красными лучами схематично обозначено пересечение лучей детекторов 2, 4, 5 и 6 внутри недоступной области подвалов ЦПБМ, область пересечения выделена жёлтыми прямоугольниками; б) та же область на объёмном изображении с привязкой к местности (области обнаруженных аномалий обозначены красными прямоугольниками).

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, а 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 12а жёлтыми 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. 12б.

На фотографии территории монастыря, см. рис. 13, 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. 4.39 б) зданий монастыря);
 область под номером 5 – подклеть в замурованном подвале;
 область под номером 6 – замурованный воздуховод в подвале.

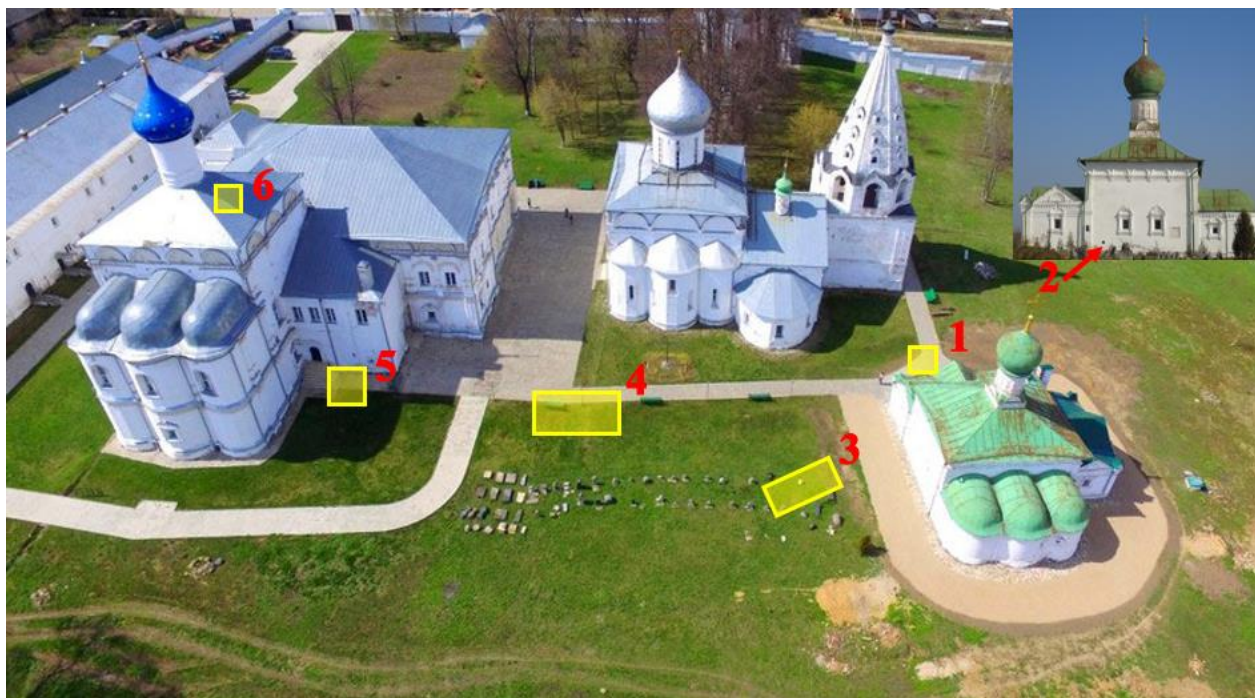


Рисунок 13. Фотография территории монастыря с указанием областей (жёлтые прямоугольники), где методом мюонографии обнаружены скрытые под землёй ранее неизвестные полости.

Проведенный методом мюонографии 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 мюонографии 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 [52].

В следующем разделе третьей главы 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 мюонографии 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. 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.14.

Всего в различных местах монастыря было установлено 13 эмульсионных детекторов. Из них два эмульсионных детектора были размещены на чердаке Успенской церкви для регистрации фоновых потоков 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».

Регулируемые ножки конструкции детектора позволили выравнивать все детекторы по уровню, несмотря на перепады высот естественного грунта внутри пещер. Определение пространственного расположения установленных детекторов выполнялось с использованием современного геодезического оборудования, включая электронный тахеометр, лидарную и аэрофотосъемку, что обеспечило сантиметровую точность измерения положения детекторов в единой системе координат.



Рисунок 14. 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.

В данном эксперименте значительный вклад в интересующие области исследования вносили околоразрывные мюоны. Для учета эффективности регистрации мюонов от зенитного угла θ , был введен поправочный коэффициент, который определялся как отношение величины потока, рассчитанной по аналитической формуле с известным значением константы, к экспериментальной величине потока по данным горизонтального детектора для того же зенитного угла.

Моделирование проводилось для всех тринадцати детекторов с учётом их расположения на исследуемой территории Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря.

Правильность подхода к обработке и интерпретации данных, как и в эксперименте Свято-Троицкого Данилова монастыря, проверялась наличием наблюдаемых архитектурных особенностей в поле зрения детекторов.

Алгоритм поиска и идентификации скрытых неоднородностей пещерного храма монастыря включал несколько основных этапов:

шаг 1: обработка данных горизонтального фонового детектора и определение поправки на эффективность детектора;

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° , 1.5° , 2.0° , 2.5° ;

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

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 ;

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 объёма 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. Пример наложения функции $G(X, Y, Z)$ в интервале высот $Z = 79 \div 80$ м на карту местности с разбиением по углам $\Delta\varphi = 1.5^\circ$, $\Delta\theta = 1.5^\circ$ представлен на рисунке 15.

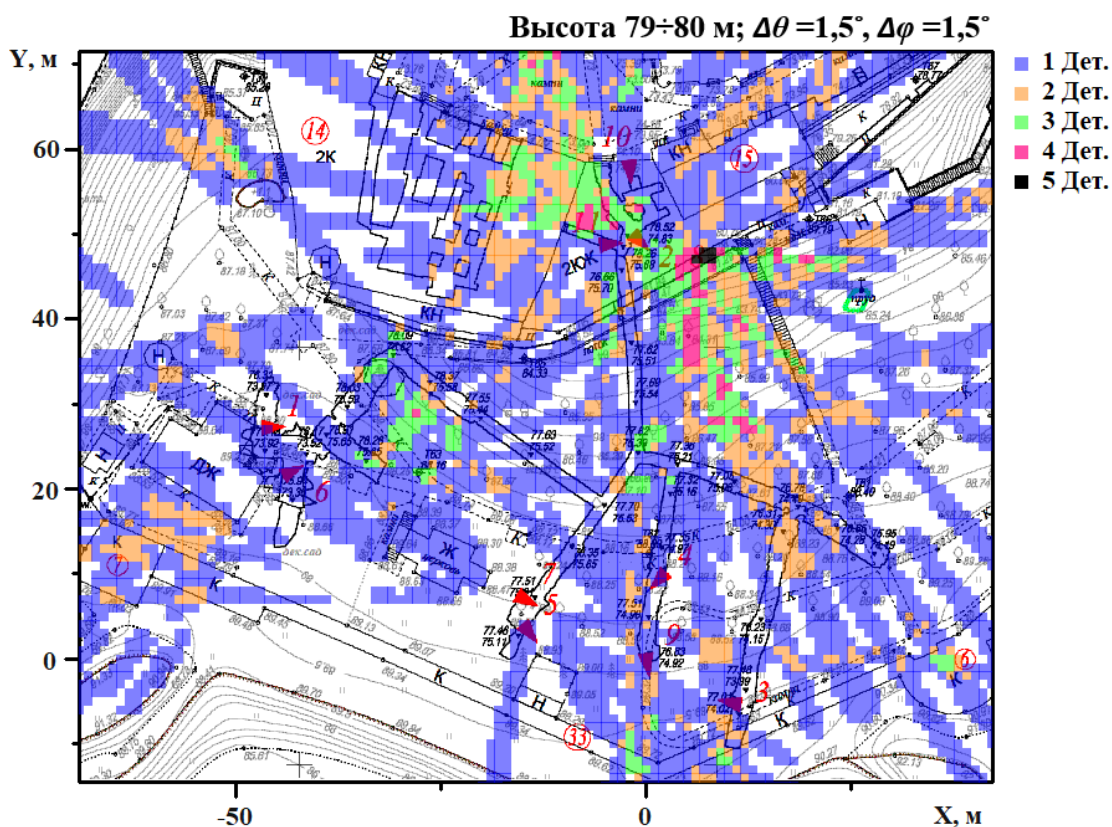


Рисунок 15. Карты пересечения локальных максимумов на высоте 79÷80 м; светло-фиолетовым цветом обозначены направления локальных максимумов, зарегистрированных 1 детектором, оранжевым – 2 детекторами, светло-зелёным – 3 детекторами, розовым – 4 детекторами, чёрным – 5 детекторами; разбиения по углам: $\Delta\varphi=1,5^\circ$, $\Delta\theta=1,5^\circ$.

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 $2,5 \times 2,5 \text{ м}^2$. От склепа в направлении, перпендикулярном Главной улице, отходит коридор шириной от 1 до 3 метров и длиной до 12 метров.

На рисунках 16 - 17 в качестве примера представлены наиболее крупные найденные в данном эксперименте неизвестные полости, совмещенные с выполненной лидарной съемкой исследуемых пещер.



Рисунок 16. 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.

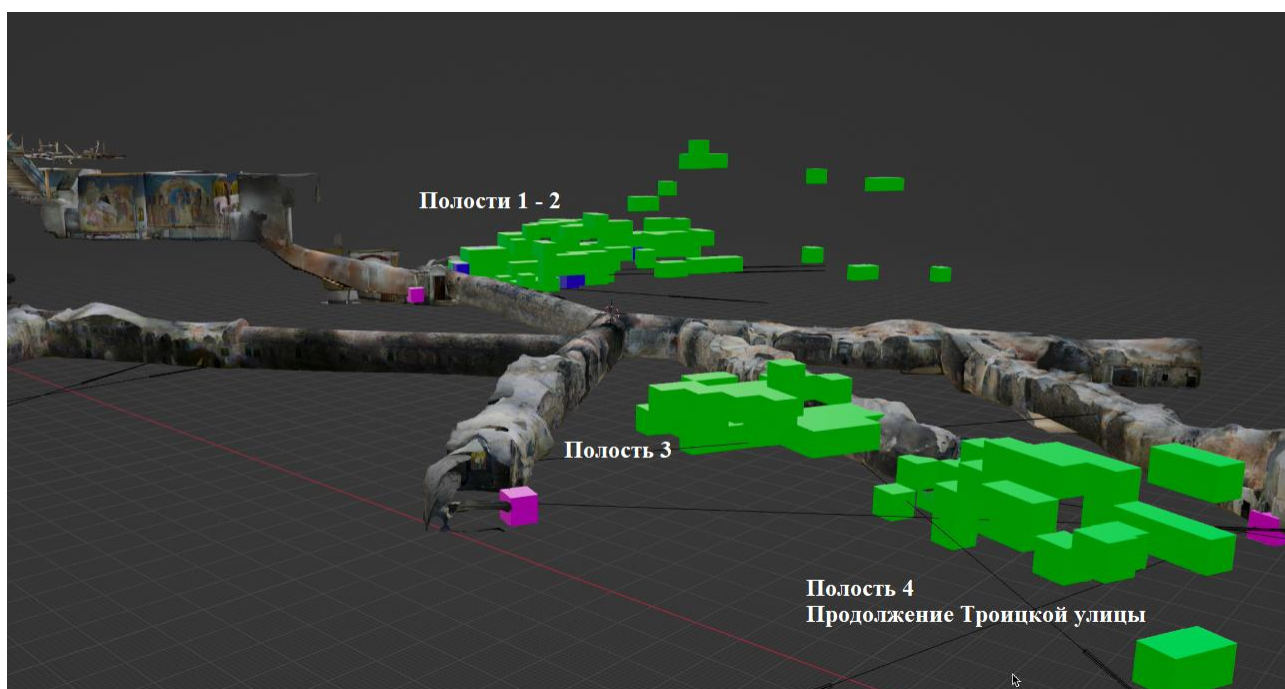


Рисунок 17. Лидарная съемка видимых границ «улиц» Богом зданных пещер с совмещенными экспериментальными результатами. Неизвестные ранее невидимые объекты обозначены зелеными квадратами размером 1 м^3 каждый. На рисунке представлены наиболее крупные найденные в эксперименте *полости 1-2* (склеп и коридор за ним), *полость 3* (продолжение Троицкой улицы) и *полость 4* (коридор перпендикулярный Троицкой улице).

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.

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** сформулированы основные результаты работы:

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.

Диссертацию дополняет **ПРИЛОЖЕНИЕ**, содержащее авторские программы для реконструкции треков с использованием внешних параметров и пакета FEDRA.

Основные публикации автора по тематике диссертации:

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., Buonaura 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.

Список цитированной литературы:

1. 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.
2. SND@LHC collaboration, Shchedrina T. Observation of Collider Muon Neutrinos with the SND@LHC Experiment // Phys.Rev.Lett. 2023. Vol. 131, № 3. P. 031802.
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. Di Liberto S., Ginobbi P. Automatic device for measurements of heavy ion tracks in plastics // Nucl. Instruments Methods. 1977. Vol. 147, № 1. P. 75–78.
8. Abmayr W. et al. Read-time automatic evaluation of solid state nuclear track detectors with an on-line TV-device // Nucl. Instr. & Meth. 1977. P. 79–81.
9. Schott J.U., Schopper E., Staudte R. A high-precision video-electronic measuring system for use with solid state track detectors // Proceedings of the 9th International Conference, Neuherberg/München, 30th September–6th October 1976. 1978. P. 615–623.
10. 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.
11. Садыков Ж. Экспериментальные исследования на основе методики трековых детекторов в физике элементарных частиц, рукопись кандидатской диссертации. 2025.
12. 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.
13. 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.
14. Erskine J.R. Nuclear track emulsions // Nucl. Instruments methods. Academic Press, New York, 1979. Vol. 162, № 1–3. P. 371–378.
15. Ochialini G.P.S. et al. Processes involving charged mesons // Nature. 1947. Vol. 159. P. 694–697.
16. Dobrotin N.A. International cosmic ray conference // Sov. Phys. Usp. 1960. Vol. 2. P. 679–691.
17. CHORUS Collaboration. Measurement of charm production in neutrino charged-current interactions // New J. Phys. 2011. Vol. 13.
18. DONuT collaboration. Final tau-neutrino results from the DONuT experiment // Phys. Rev. D - Part. Fields, Gravit. Cosmol. 2008. Vol. 78, № 5.

19. OPERA collaboration. Final results on neutrino oscillation parameters from the OPERA experiment in the CNGS beam // *Phys. Rev. D*. 2019. Vol. 100.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Vasilev V. et al. Modernization of the Automated Scanning Complex for Data Processing of the SND@LHC Experiment // *Phys. At. Nucl.* 2023. Vol. 86. P. 2251–2255.
25. Gorbunov S. et al. Track technique in present-day physics of atomic nuclei and elementary particles, astrophysics, and nanotechnology // *Physics-Uspekhi*. 2024. Vol. 67. P. 779–802.
26. Bailey R. et al. The CERN neutrino beam to Gran Sasso (NGS): Tech. Rep.: CERN-SL-99-034-DI. INFN-AE-99-05. Geneva: CERN, 1999. Addendum to report CERN 98-02, INFN-AE-98-05 [Electronic resource]. 1999. P. 31. URL: <https://cds.cern.ch/record/390779>.
27. Shchedrina T. Scanning OPERA films with using LASSO. OPERA Scanning and Analysis meeting. 2014.
28. Shchedrina T. Location and Decay Search. OPERA Scanning and Analysis meeting. 2014.
29. OPERA collaboration. Dataset of tau neutrino interactions recorded by the OPERA experiment // *EPJ Web Conf.* 245. 2020. Vol. 245.
30. Di Crescenzo A. et al. Candidate 121230324048. Cross-check at Naples, OPERA Scanning and Analysis meeting. 2013.
31. 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.
32. 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.
33. Agafonova N. et al. Final Results of the OPERA Experiment on nu-tau Appearance in the CNGS Neutrino Beam // *Phys. Rev. Lett.* 2018. Vol. 120. P. 211801–211807.
34. 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.
35. 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.

36. Shchedrina T. Status and plans for emulsion production in Russia. 8th SND@LHC Collaboration meeting. 2022.
37. Shchedrina T. Emulsion production in Russia for 2023. 14th SND@LHC Collaboration meeting. 2023.
38. Shchedrina T. SLAVICH emulsion data quality. 15th SND@LHC Collaboration meeting. 2023.
39. SND@LHC collaboration. Emulsion Targets [Electronic resource] // Emulsion targets in LHC Run3. 2025. URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/SndLHC/EmuTarget>.
40. Albanese R. et al. Observation of Collider Muon Neutrinos with the SND@LHC Experiment // Phys. Rev. Lett. 2023. Vol. 131, № 3. P. 031801-1-031801–031809.
41. 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.
42. 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.
43. Kremer J. et al. Measurements of Ground-Level Muons at Two Geomagnetic Locations // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 83, № 21.
44. Dmitrieva A.N. et al. Measurements of integral muon intensity at large zenith angles // Bull. Russ. Acad. Sci. 2007. Vol. 71, № 4. P. 552–555.
45. Alexandrov A. et al. A new fast scanning system for the measurement of large angle tracks in nuclear emulsions // J. Instrum. 2015. Vol. 10, № 11.
46. 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.
47. Васина С.Г. et al. Результаты тестового эксперимента по оптимизации количества эмульсионных слоев в современных ядерно-физических исследованиях с трековыми детекторами // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2022. Vol. 12. P. 46–55.
48. Dedenko L.G. et al. Prospects of the study of geological structures by muon radiography based on emulsion track detectors // Bull.Lebedev Phys.Inst. 2014. Vol. 41. P. 235–241.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. Giammanco A. et al. Towards using cosmic rays to image cultural heritage objects // iScience. 2025. Vol. 28, № 3. P. 11094.