

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

Щедрина Татьяна Викторовна

Доклад по диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
Специальность: 1.3.2 - приборы и методы экспериментальной физики

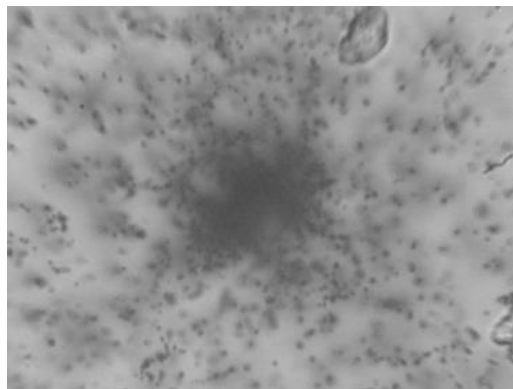
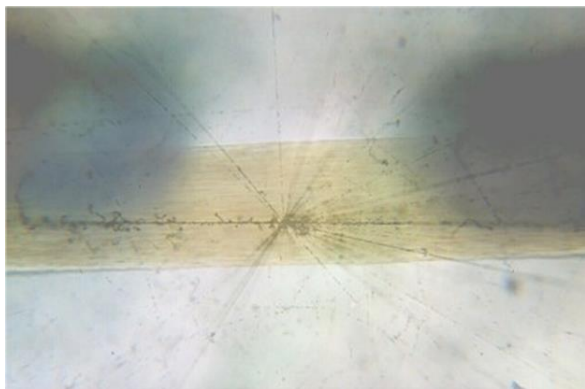
Москва, 2025 г.

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, в частности, при работе с детекторами на основе ядерной фотоэмульсии.

Трудоёмкость визуальной обработки данных в прежних экспериментах привела к закрытию специализированными предприятиями производства ядерной фотоэмульсии. Для возобновления исследований на основе эмульсионных детекторов необходимо было решить две актуальные проблемы - восстановление производства высококачественной ядерной эмульсии и создание высокотехнологичных сканирующих микроскопов.

Восстановление производства ядерных эмульсий может быть реализовано исключительно с использованием сложных технологий на основе коллоидной химии в условиях промышленного производства. Решение этой актуальной проблемы восстановления производства потребовало разработки методик исследования, тестирования и оптимизации параметров фотоэмульсий, направленных на создание эффективных технологических процессов, обеспечивающих стабильное промышленное производство высококачественных эмульсий.



Актуальность тематики исследования

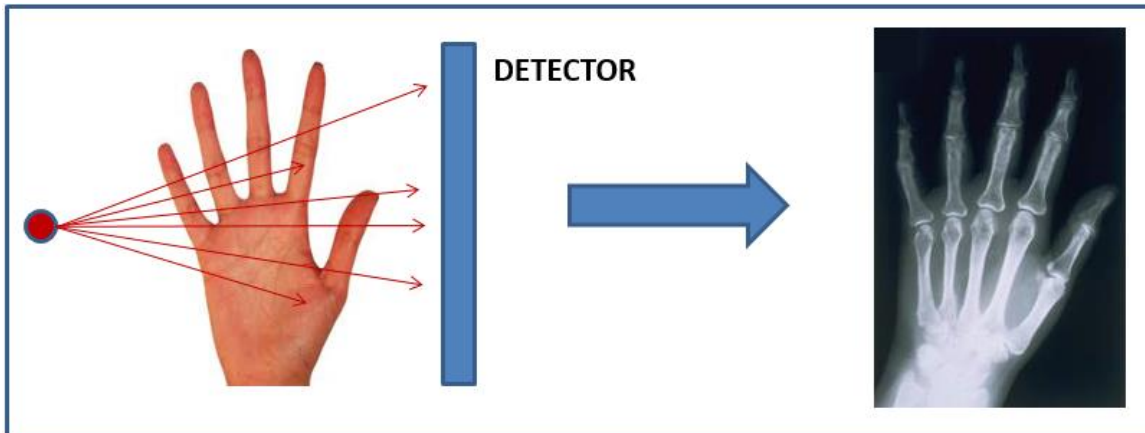
Проблема обработки эмульсионных данных была в значительной мере преодолена благодаря прогрессу в создании оптических столов с высокой точностью автоматизированного перемещения, применению современных приборов с зарядовой связью для регистрации и оцифровывания оптических изображений и вычислительным возможностям 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. 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.



Актуальность тематики исследования

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

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



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 достижения целей работы 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

Для достижения целей работы необходимо было решить следующие задачи:

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 мюнографии крупных объектов на основе использования эмульсионных детекторов:

3.1 Для реализации мюнографических 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 мюнографические эксперименты, в ходе которых разработать принципиальную механическую конструкцию детектора, определить оптимальные условия экспозиции, создать эффективные алгоритмы обработки и анализа данных.

Для достижения целей работы необходимо было решить следующие задачи:

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

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

Научная новизна работы, достоверность и практическая значимость работы

Открытие осцилляций мюонных нейтрино в таонные в эксперименте OPERA со статистической значимостью $6,1\sigma$.

В новом церновском эксперименте SND@LHC для нейтринной мишени разработана концепция конструкции эмульсионного детектора для регистрации нейтрино всех трех ароматов. 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.

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.

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.

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 мюнографических экспериментов, подтвердивших правильность созданной комплексной авторской методики исследований
- при проверке данных, полученных на ПАВИКОМ путем их перекрестного сканирования в лабораториях Швейцарии и Италии
- данными архивных документов об исследованных объектах культурного наследия
- путем успешного распознавания с использованием авторского программного обеспечения визуально проверяемых элементов в ходе выполнения мюнографических работ

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. Опыт 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.

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

Основные положения, выносимые 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 мюонографии объектов культурного наследия.
3. Выявление новых особенностей внутренней структуры культурных объектов федерального значения - Свято-Троицкого Данилова и Свято-Успенского Псково-Печерского монастырей.

Эмульсионные трековые детекторы широко используются в экспериментах по физике частиц с 1896 года

Открытие радиоактивности с помощью фотоэмульсии

1896: П. Беккерель случайно открывает "урановые лучи", изучая фосфоресценцию

1898: М. Кюри вводит термин "радиоактивность" и открывает полоний/радий

1900: Э. Резерфорд классифицирует α -, β - и γ -излучения

Открытие π -мезона

С. Пауэлл и др. открыли заряженные пионы, исследуя треки космических лучей в фотоэмульсиях

Экспериментальное подтверждение теории Юкавы (1935) о переносчиках ядерных сил

Открытие странных частиц

K^+ (1947): обнаружен в эмульсиях Бристольской группой как "V-частица" с массой $\sim 500 \text{ MeV}$

K^0 (1956): идентифицирован по распаду $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ (треки в эмульсиях образовывали "вилку")

Аэростатные эксперименты для прямых измерений космических лучей

MUBEE (Moscow University Balloon Experiment), JACEE (Japan-America Collaborative Emulsion Experiment)

Измерение энергетического спектра и химического состава первичных космических лучей, исследование ядерных взаимодействий при ультравысоких энергиях

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.

Спрос на промышленную высококачественную ядерную фотоэмульсию резко сократился, и предприятия-производители: Ильфорд, Истмен-Кодак, Геверт, Фуджи, ОРВО, ГОСНИИХИМФОТОПРОЕКТ закрыли её производство.

Благодаря развитию производства прецизионной, вычислительной техники и методов обработки в настоящее время стала возможной реализация экспериментов, использующих десятки и даже сотни тысяч квадратных метров ядерной фотоэмульсии для фундаментальных и прикладных исследований

OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus)

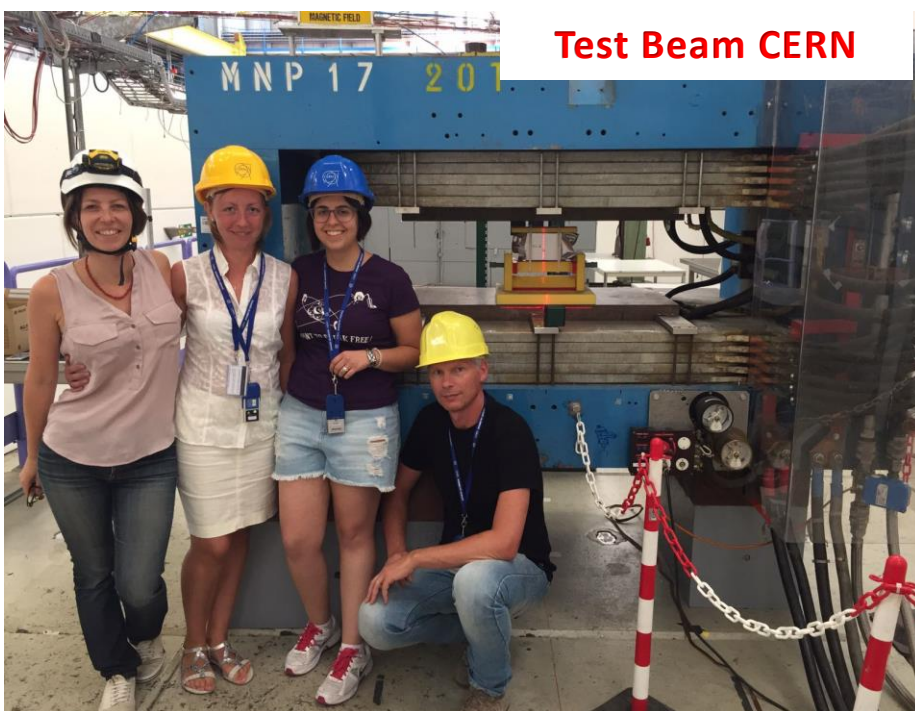
FASER ν LHC (Forward Search Experiment for Neutrinos)

NEWSdm (Nuclear Emulsions for Weakly Interacting Massive Particles Search with Directional Measurement)

NINJA (Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator)

SND@LHC (Scattering Neutrino Detector)

FOOT (FragmentatiOn Of Target)



Test Beam CERN



Сканирующая лаборатория LNGS, ГранСассо



OPERA



Тестовые прояски CERN



NEWS



SND@LHC

Восстановление производства ядерной фотографической эмульсии в России

Технические требования к ЯФ для научных исследований

1. Средняя чувствительность: 30-35 зерен на 100 мкм трека

Чувствительность должна сохраняться на уровне 90% от начальной в течение одного года. Отклонение от средней чувствительности по глубине слоя 4–5 %. Отклонение от средней чувствительности в партии: 4%. Отклонение от средней чувствительности от партии к партии: 5 %

2. Толщина эмульсионного слоя при поливе: 50 ± 5 мкм, база (ТАЦ основа): 175 мкм

Наиболее востребованные («ОПЕРНЫЕ») размеры эмульсионного слоя: 100 мм ×125 мм. По согласованию заказчика с изготовителем возможен выпуск эмульсионных слоев других размеров

3. Условия производства в темной комнате: температура ~ 20° С, влажность ~40-50 %

4. Радиус изгиба пластины): менее 1 мм

5. Объемная вуаль (число зерен вуали в объеме 10^3 мкм³): 3.0–4.0

6. Средний диаметр проявленного зерна: 0.5 ± 0.2 мкм

7. Габитус проявленного зерна – сфера

8. Регрессия скрытого изображения (зависимость потери чувствительности от времени хранения облученной эмульсии) при температуре 20° и влажности 60%: 12 % - 15% в течение года

Каждая производимая партия должна сопровождаться проявленным контрольным тестовым образцом, размером 100 мм ×125 мм для микроскопической оценки качества продукции. Упаковочный пакет каждой партии должен содержать информацию о дате синтеза и полива эмульсионного слоя, толщине политого слоя до проявки, толщине ТАЦ, размере и количестве фотозэмульсионных слоев в упаковке на русском и английском языках. Для транспортировки эмульсия должна быть упакована в свето- и водонепроницаемые пакеты, жестко зафиксированные ровной поверхностью с обеих сторон упаковки во избежание механической деформации слоев во время транспортировки.

Подбор и испытания желатина различных производителей

- ❑ PB Gelatin (Бельгия)
- ❑ GELITA (Германия)
- ❑ Rousselot (Франция)
- ❑ Nitta Gelatin (Япония)
- ❑ Eastman Gelatine Corporation (США)
- ❑ JSC Mojelit (Белоруссия)

Протестировано ~ 40 синтезов

- Высокая оптическая прозрачность
- Химически чистый
- Равномерное распределение зерен после проявки
- Высокая чувствительность регистрации заряженных частиц



Полный цикл производства ЯФ

Синтез
эмульсионного геля

Рефонд
ввод дополнительных веществ
для формирования фотографических
и физико-механических свойств

Полив и сушка
эмульсионных слоев

Нарезка и подготовка
к транспортировке
эмульсионных слоёв

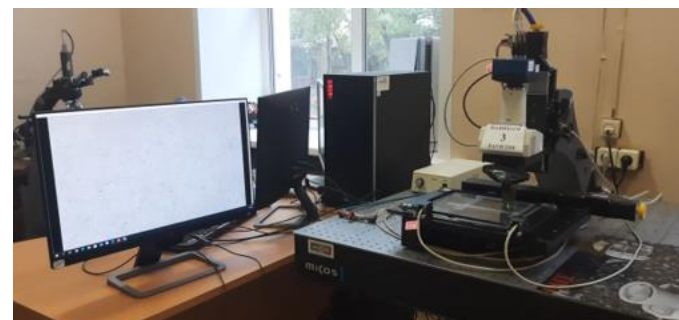
Контроль качества

- эмульсификация
- физическое созревание
- отделение твердой фазы
- химическое созревание

Готовая продукция

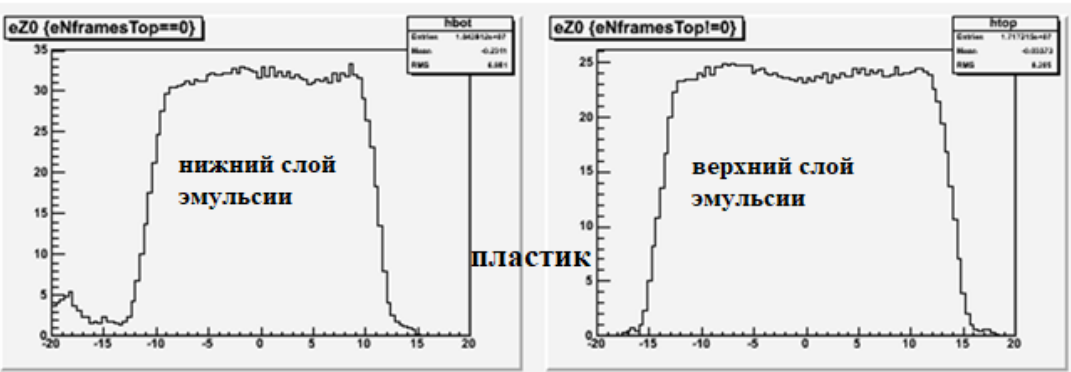


Протестировано ~ 100 синтезов
для подбора оптимальных
параметров и рецептуры

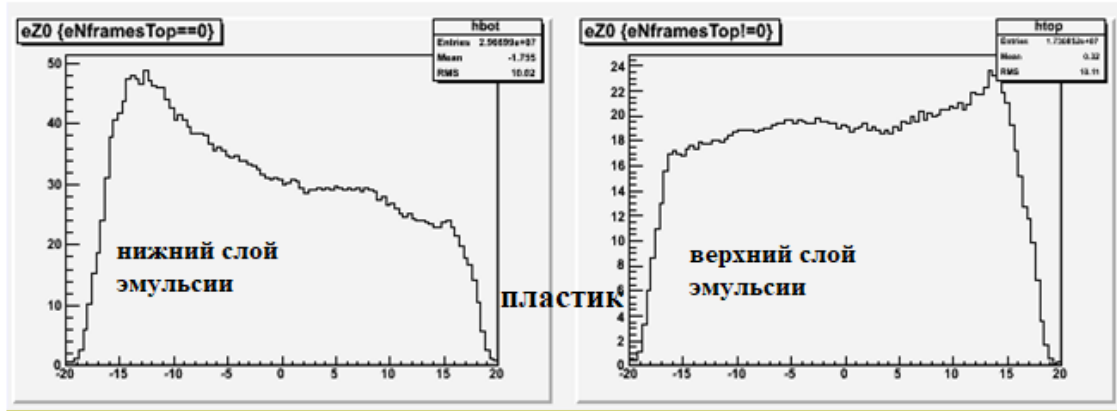
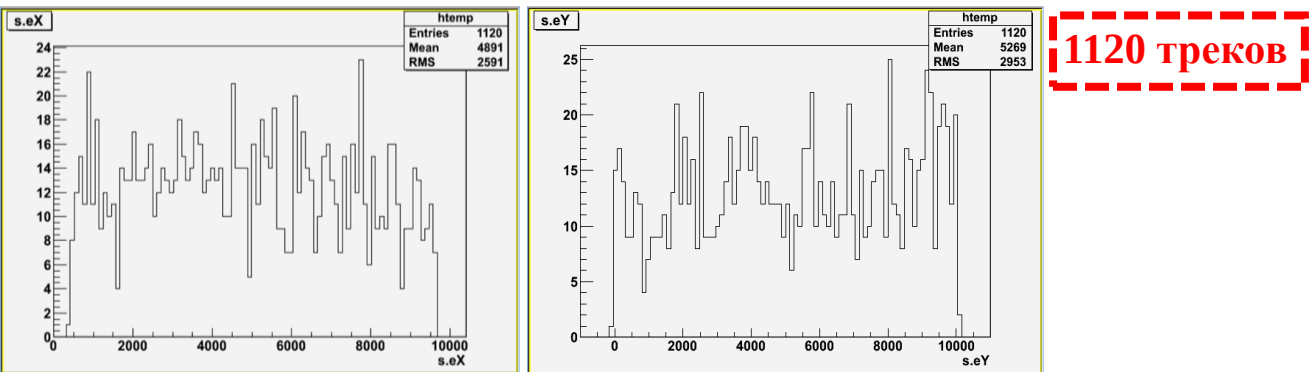


Подбор рецептуры проявки

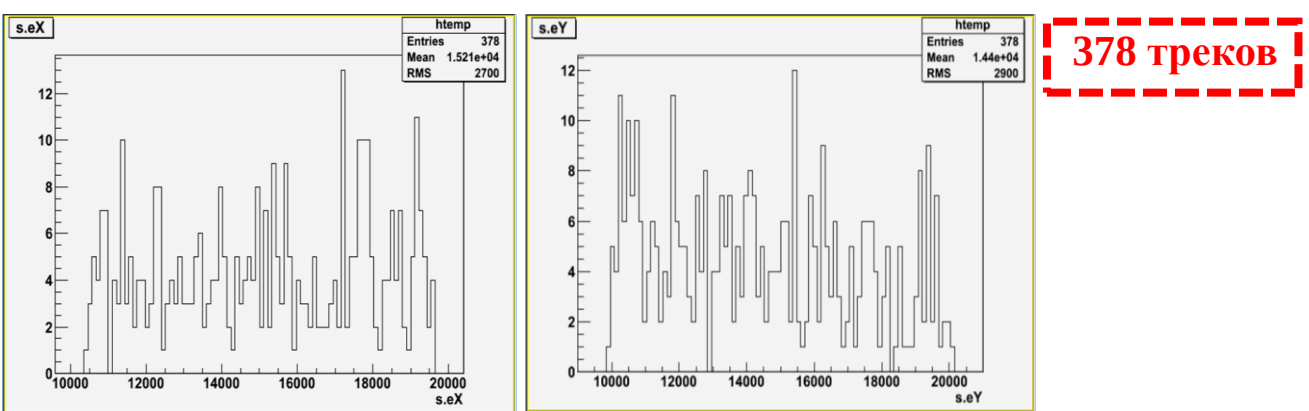
Распределение по числу реконструированных грейнов



Распределение по координатам X, Y реконструированных треков



проявитель №2 (D-19)



Теряется часть данных при реконструкции треков !

Визуальная проверка качества фотографической эмульсии

Прозрачность эмульсии

Отсутствие дихроической
(цветной) вуали

пузырей

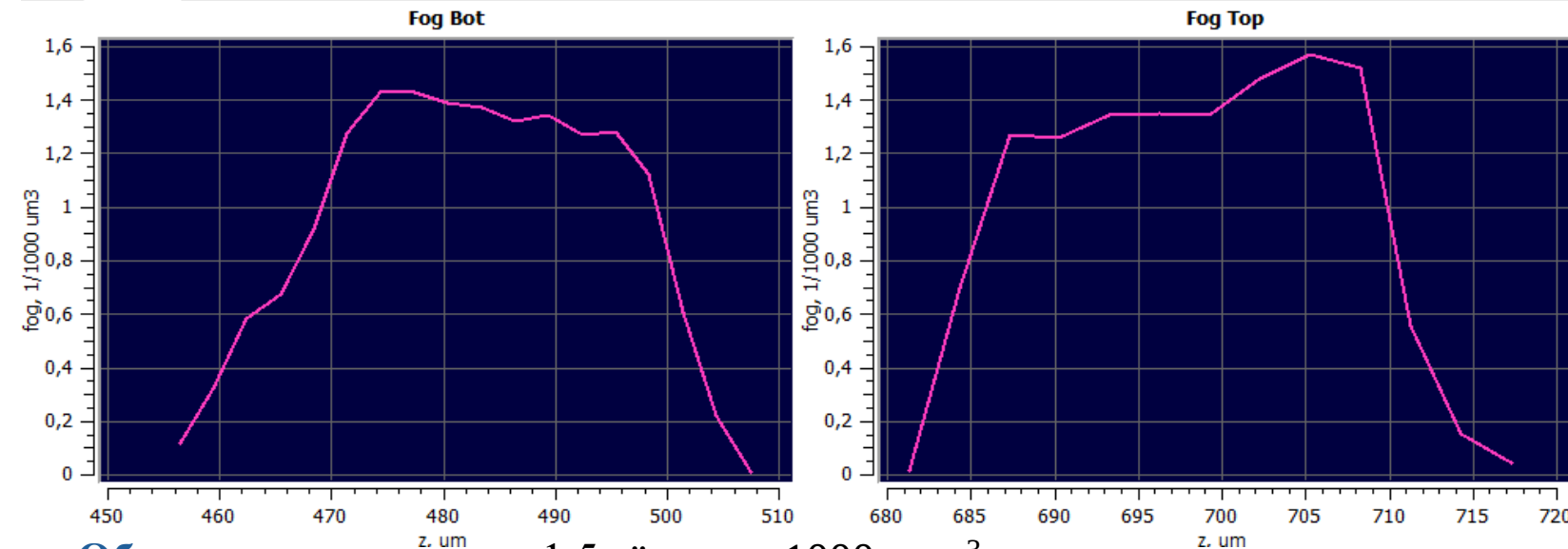
черных и белых точек

различных “грязевых” включений

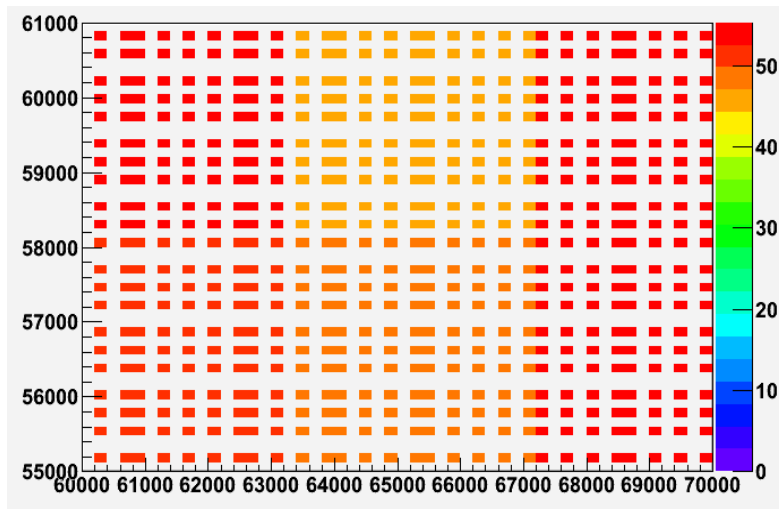
царапин

и других механических дефектов
влияющих на качество изображения
следов релятивистских частиц.

Микроскопическая оценка качества фотографической эмульсии

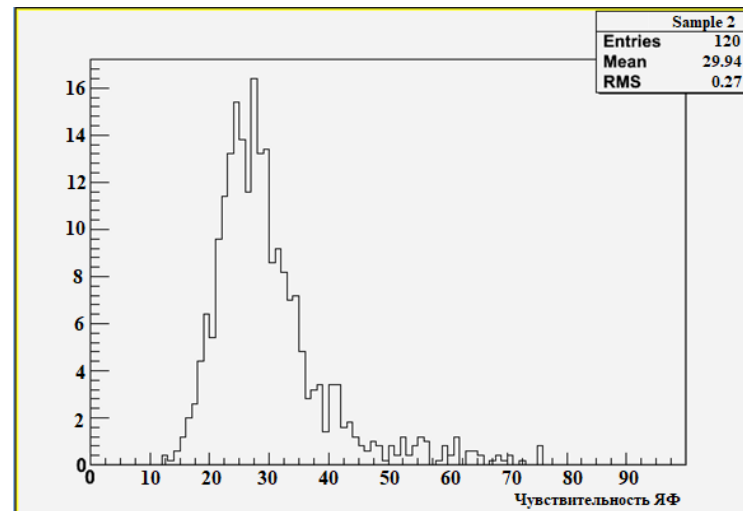


Объемная вуаль менее 1,5 зёрен на 1000 мкм³



Равномерность полива

эмульсионного геля на пленку (50±3) мкм



Чувствительность

эмульсионного слоя 30±0.3 зерен на 100 мкм

Реализованы bash скрипты

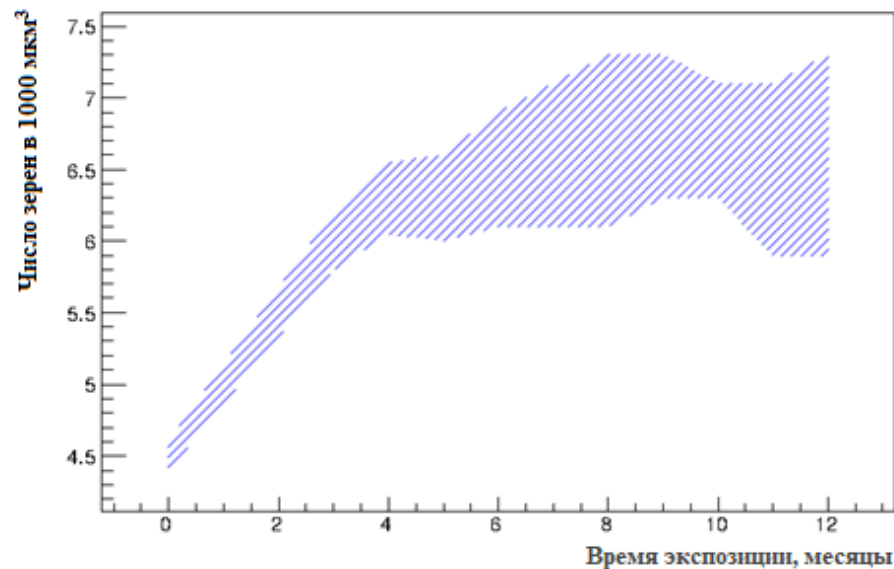
- ☐ Fog_plot.sh
- ☐ Thickness.sh
- ☐ Sensitivity.sh
- ☐ MT_distribution.sh
- ☐ BT_distribution.sh
- ☐ Efficiency.sh

Протестировано ~ 100 синтезов

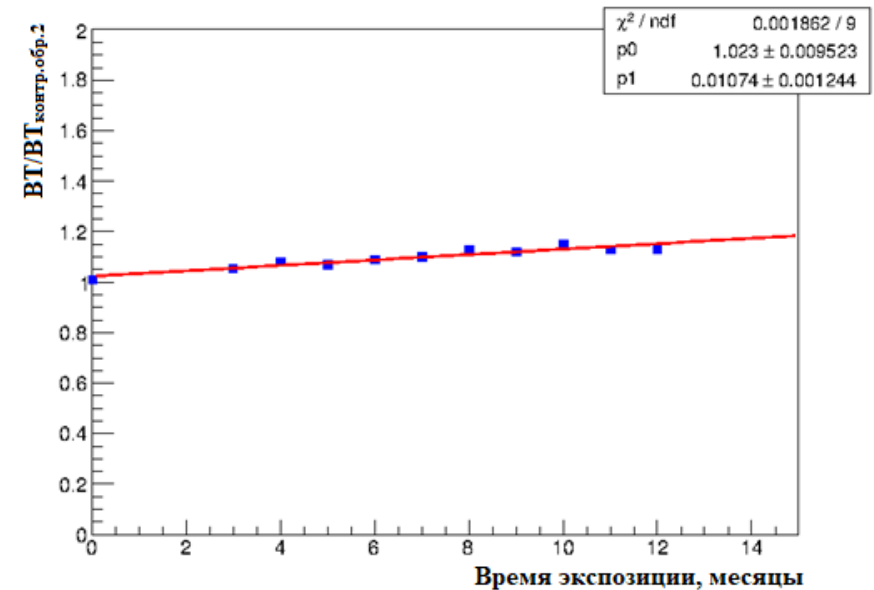
Ускоренное старение в термокамере

Экспозиция образцов ЯФ в термокамере проводилась в подземной лаборатории Гран-Сассо итальянского Национального института ядерной физики (LNGS)

24 ч. Genviro ~ 1 месяц старения
 $T = 35^{\circ}\text{C}$, $H = 50\%$



Изменение числа зерен вуали с течением времени

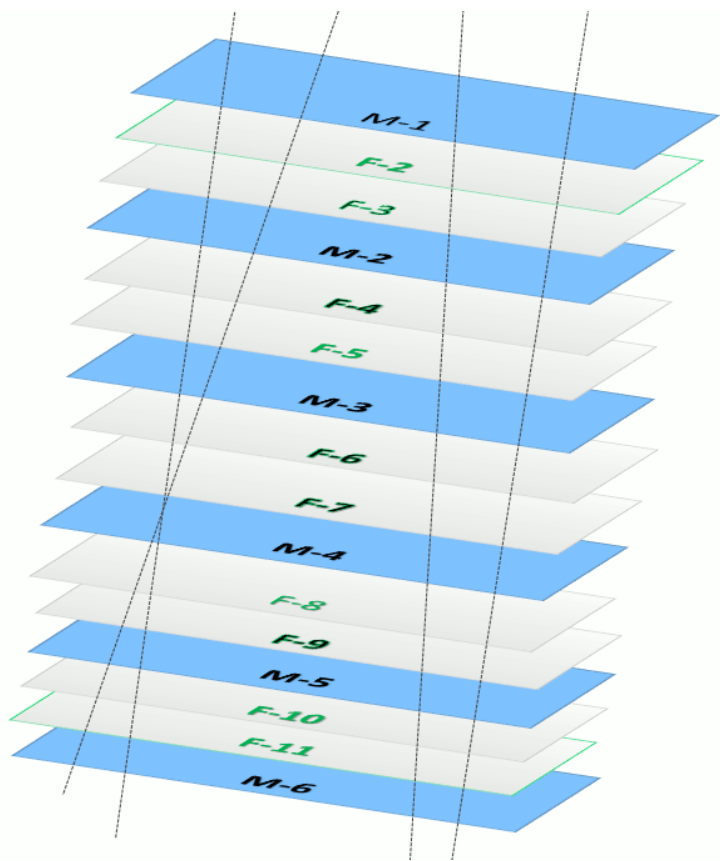


Регрессия треков с течением времени

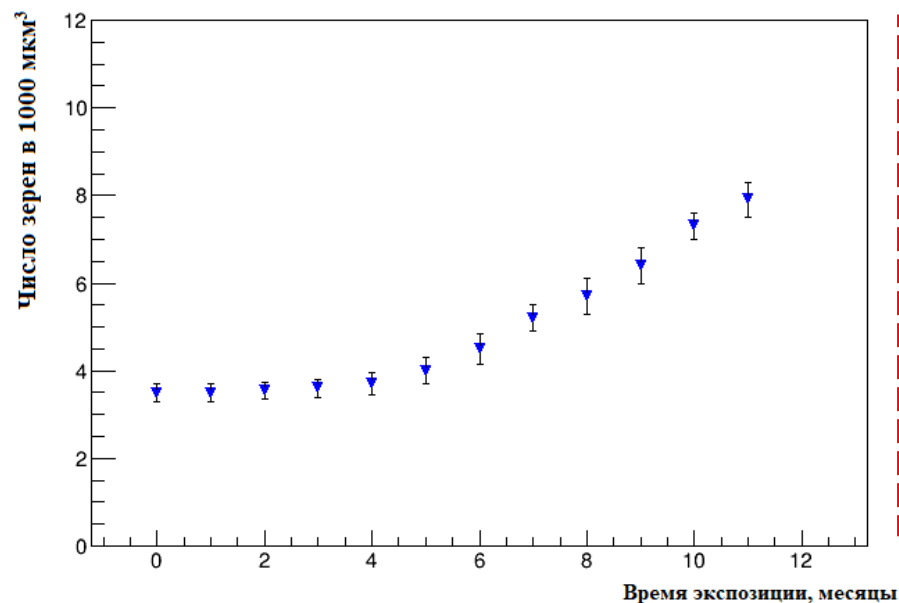
Первые 3-4 месяца ускоренного старения эмульсия демонстрирует стабильность основных свойств, заявленную производителем.
По истечении этого времени наблюдается небольшой рост объемной вуали ~ 20-25 % от первоначального.

Естественное старение фотографической эмульсии

Изменение числа зерен вуали с течением времени



Расположение эмульсионных слоёв в тесте на естественное старение



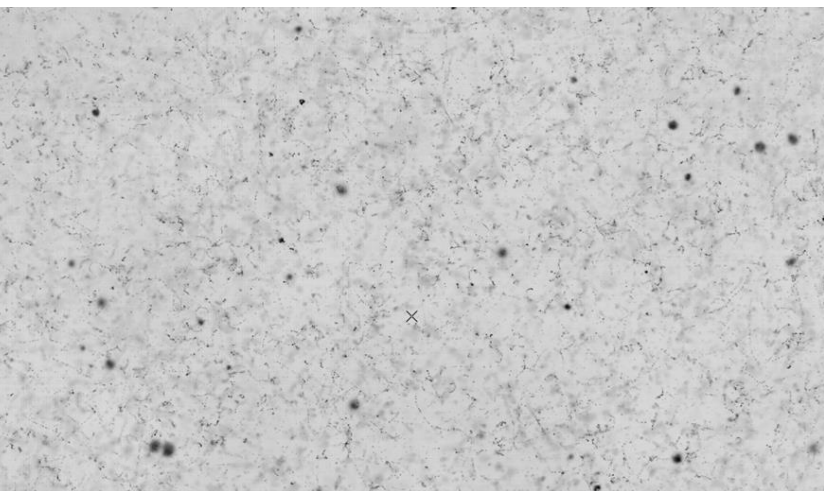
- Стабильность технических характеристик ЯФ на протяжении первых 4-5 месяцев от даты производства
- Регрессия треков в первые 6 месяцев не наблюдается, после 6 месяцев не превышает 10%



Схема сборки эмульсионных слоёв в детекторе

Процедура ”рефрешинга” (emulsions refreshing)

Фото одного поля зрения 600×800 мкм эмульсионного слоя



H=60%, T= 28°C, t=24-26 часов



H=80%, T= 28°C, t=24-26 часов



H=95%, T= 28°C, t=24-26 часов

	Влажность H, %	Температура t, °C	Время экспозиции в термокамере, часы
“Refreshing”	95	28	24 -26
Сушка	60	20	24

Условия наиболее эффективной процедуры “refreshing” ЯФ российского производства

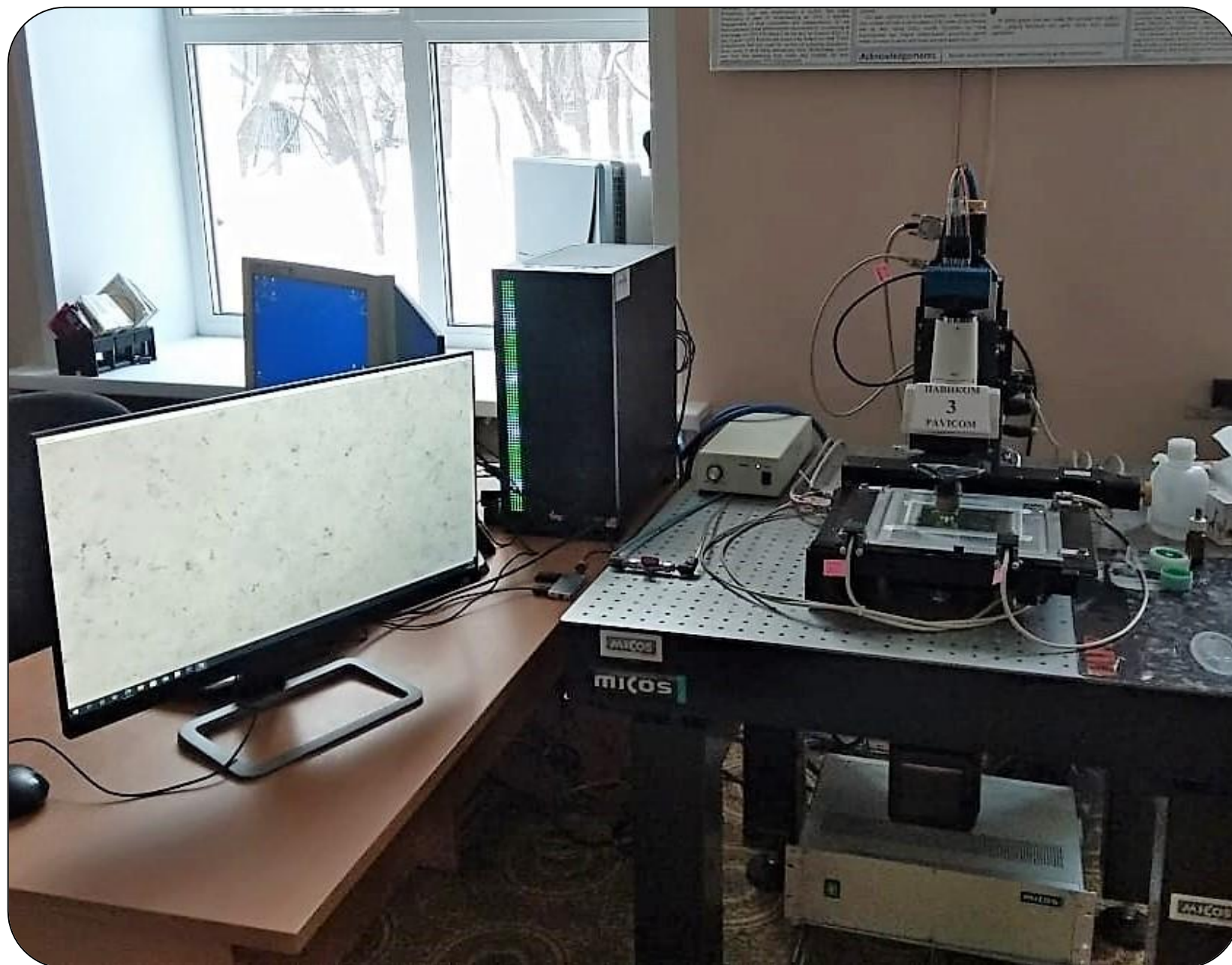


**Благодаря восстановлению
технологии производства
«СЛАВИЧ» производит ЯФ
в промышленных масштабах
до ~100 м² в год
для российских НИИ
и международных
научных организаций**

**Фундаментальные исследования
с использованием ядерной фотоэмульсии
на базе обработки данных на комплексе ПАВИКОМ**

Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс (ПАВИКОМ)

- Прецизионный стол: MICOS
- Оптическая система: NICON
- Перемещение по осям:
 $X = 120 \text{ мм}$, $Y = 120 \text{ мм}$, $Z = 30 \text{ мм}$
- Точность измерения координат:
 0.25 мкм
- CMOS-видеокамера:
Mikrotron MC-1310
- Размер изображения:
 1280×1024 пикселей
- До 500 кадров в секунду
- Рабочая станция
- Плата оцифровки и обработки
изображений: Matrox Odyssey XPro
- Скорость сканирования:
 $\text{до } 190 \text{ см}^2/\text{ч}$ двухсторонней эмульсии
- Допустимые углы треков частиц
для распознавания: $\pm 75^\circ$



OPERA

Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus – первый эксперимент по прямому наблюдению осцилляций нейтрино $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. (13 стран, 39 институтов)

Цель эксперимента OPERA - наблюдение осцилляций ν_μ в ν_τ в пучке ν_μ от ускорителя ЦЕРН посредством прямой регистрации τ -лептонов в ядерной эмульсии в подземной лаборатории Гран-Сассо.

Эксперимент OPERA

Схема подземной лаборатории LNGS

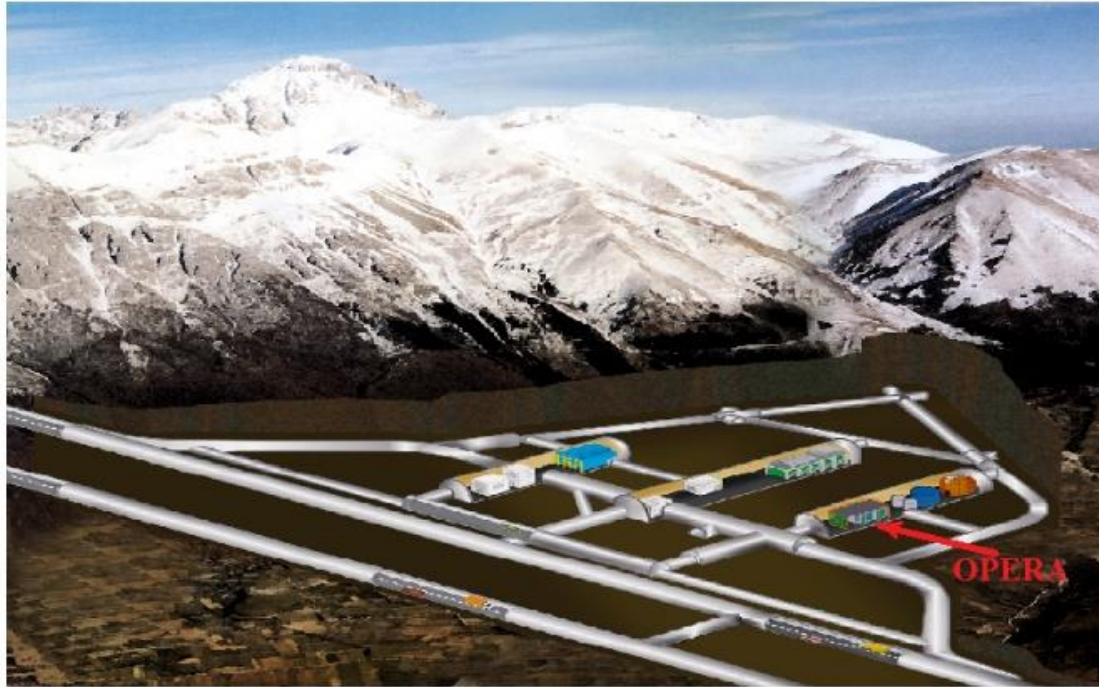
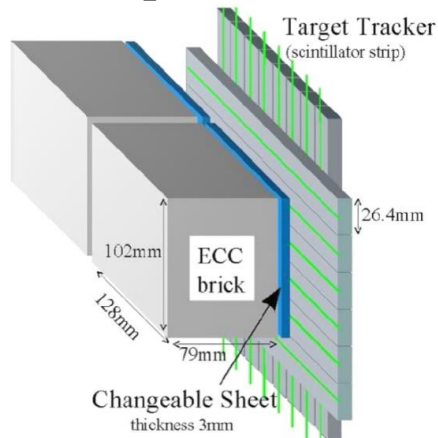
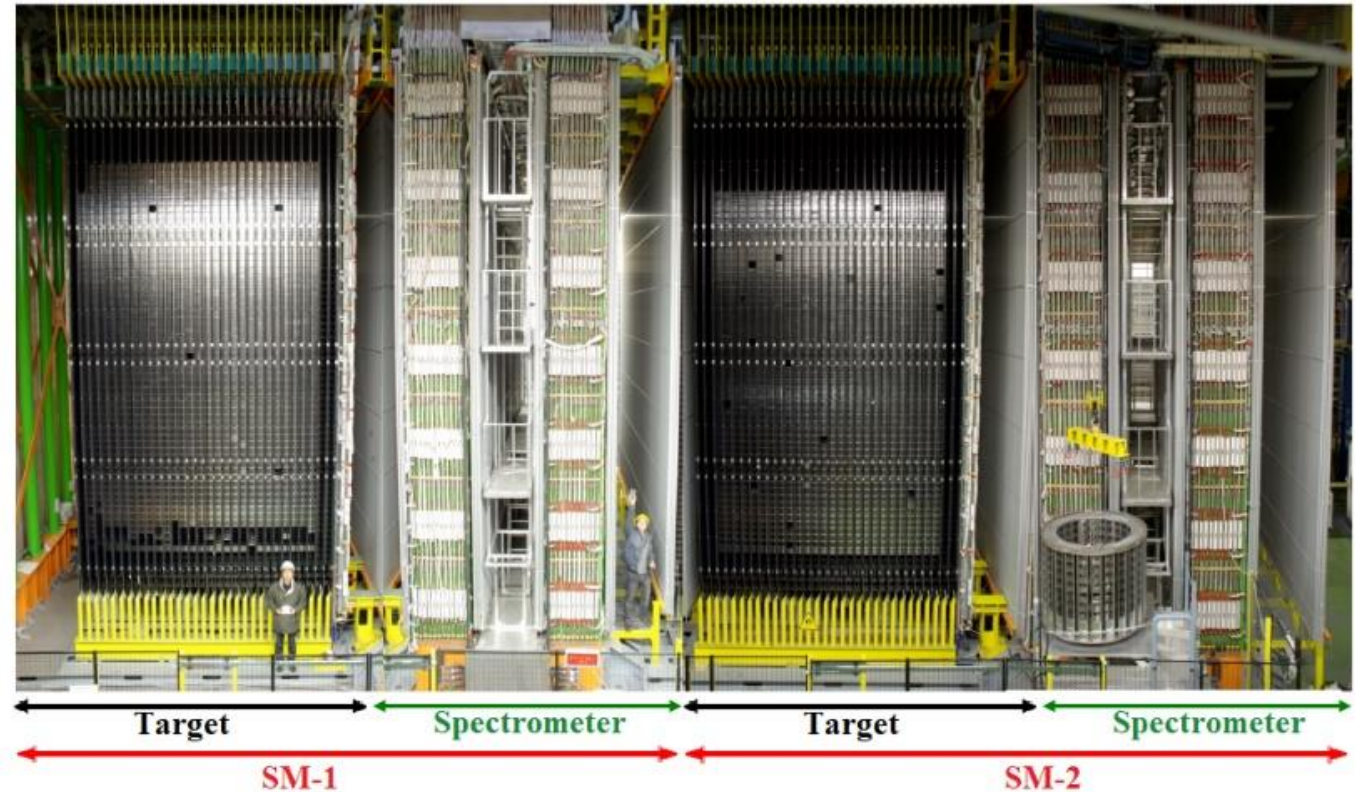


Схема монтажа кирпичей в мишени



Внешний вид детектора OPERA



Масса эмульсии ~ 100 тонн

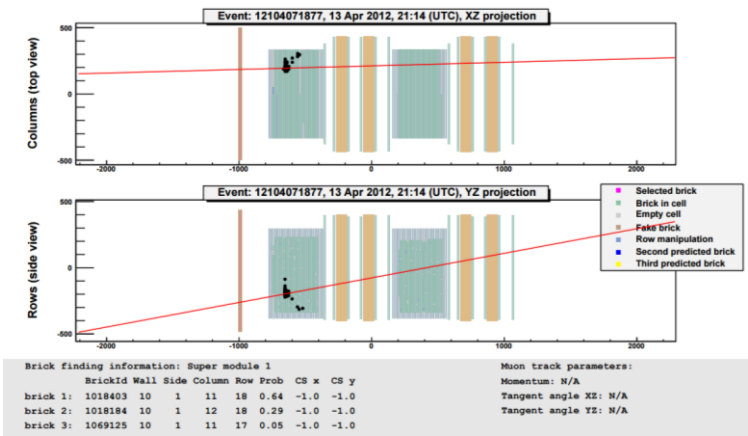
Эмульсионный кирпич $\rightarrow$ 57 двусторонних эмульсионных слоёв, чередующихся с 56 свинцовыми пластинами толщиной 1 мм

Каждая мишень $\rightarrow$ 2920 эмульсионных кирпичей

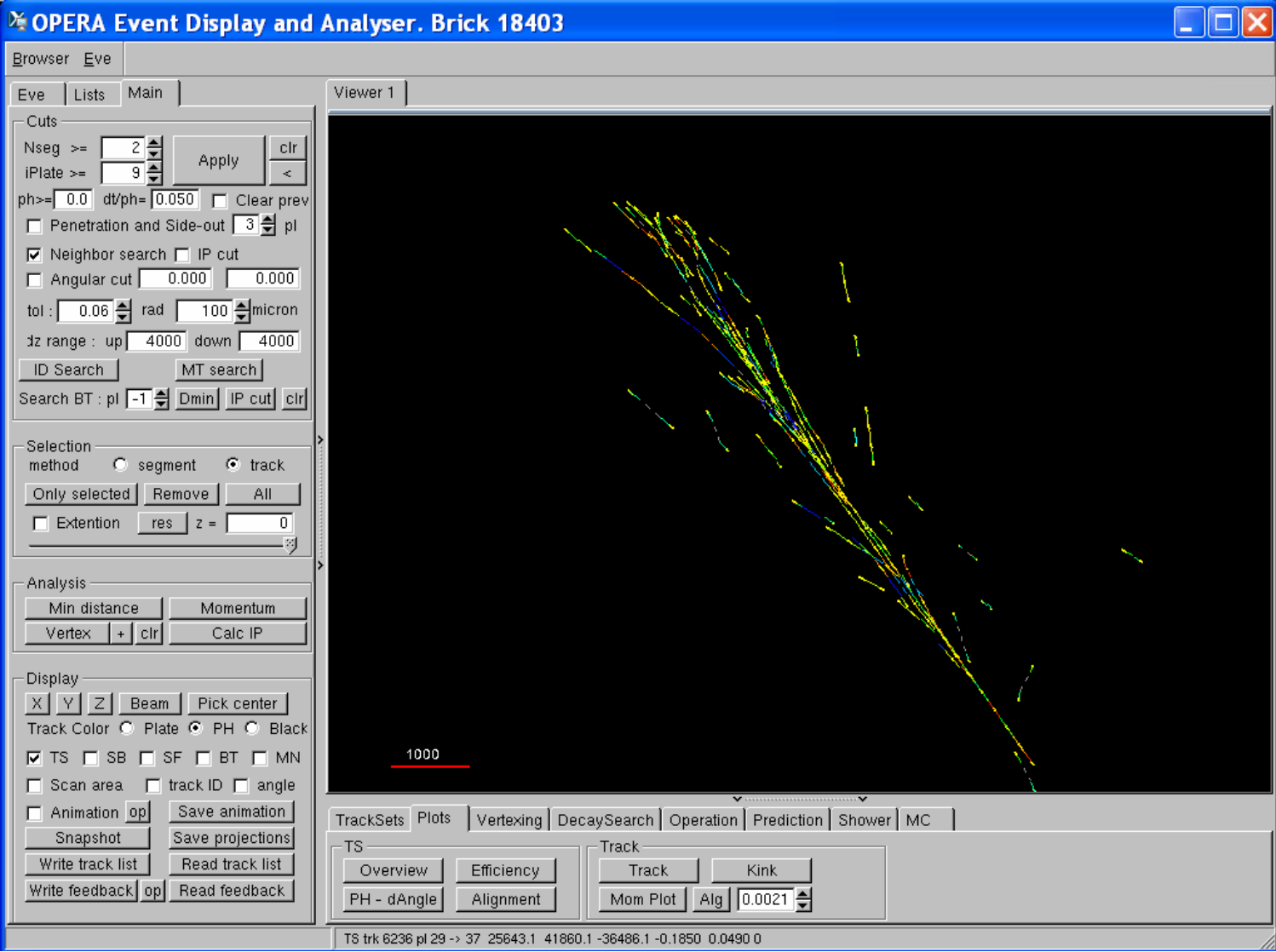
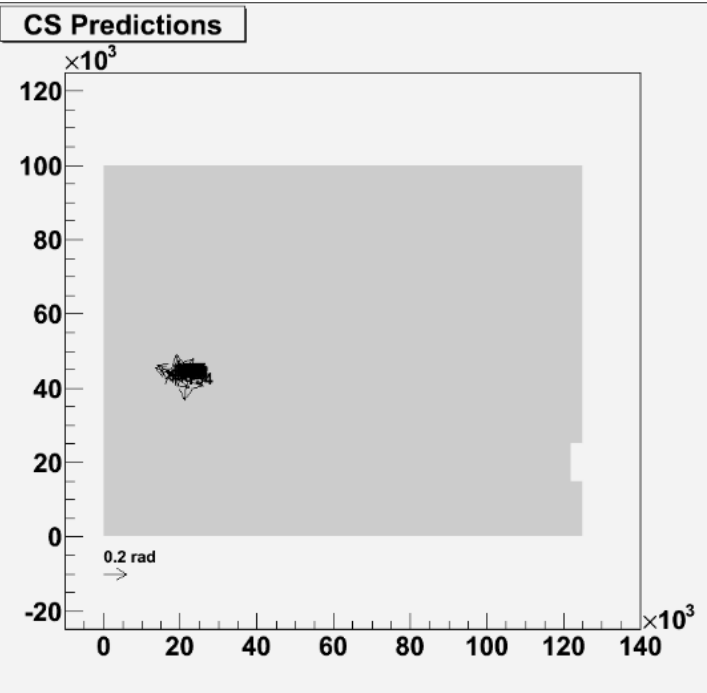
Обработка данных эксперимента OPERA на комплексе ПАВИКОМ-3

EventID:12104071877, BrickID:1018403

Вид целеуказания в электронном детекторе



Вид целеуказания в CS

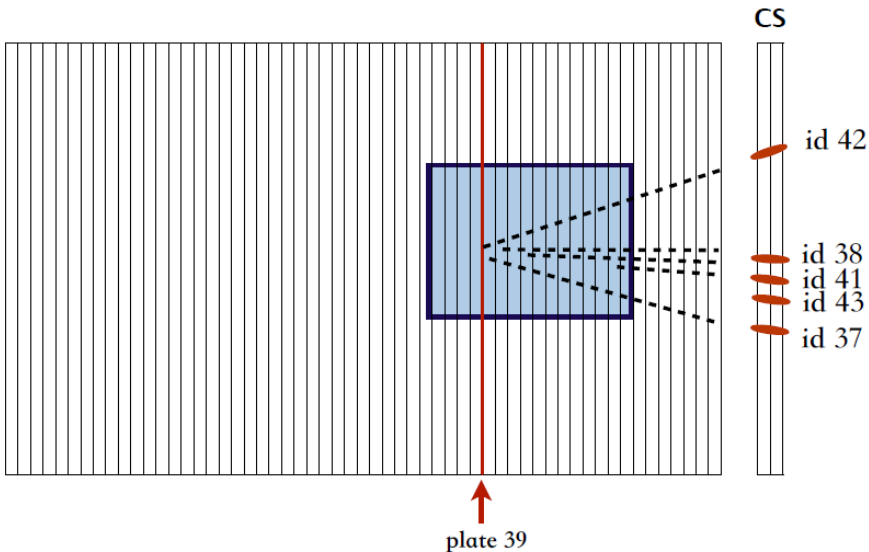
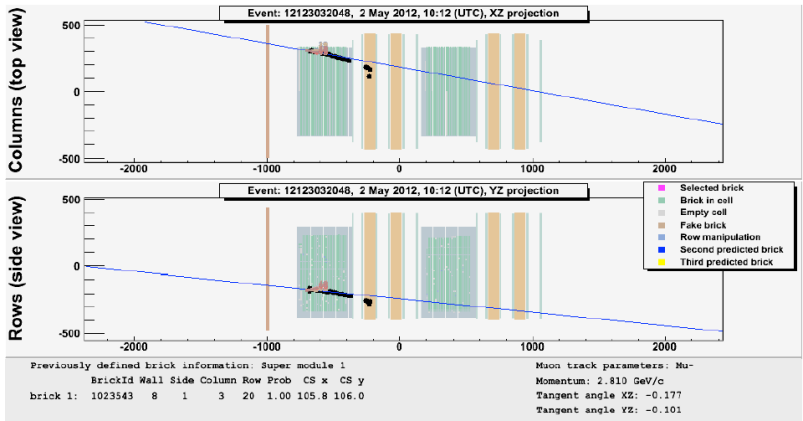


Реконструкция события

Обработка данных эксперимента OPERA, перекрестное сканирование

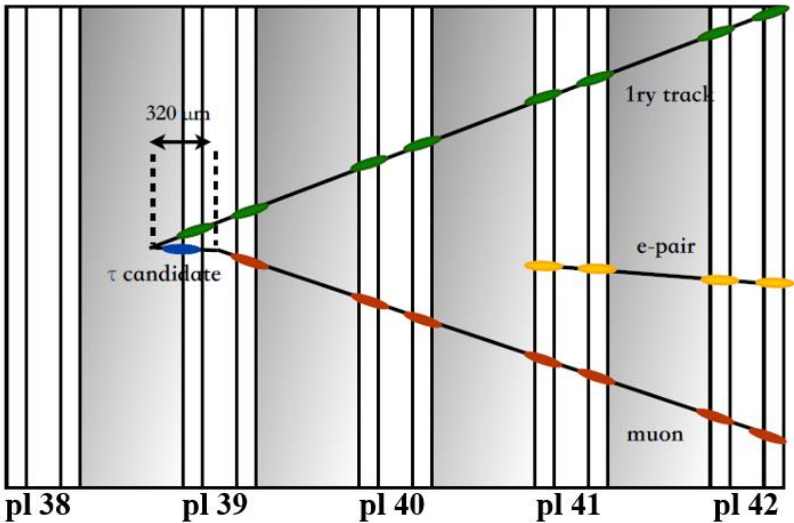
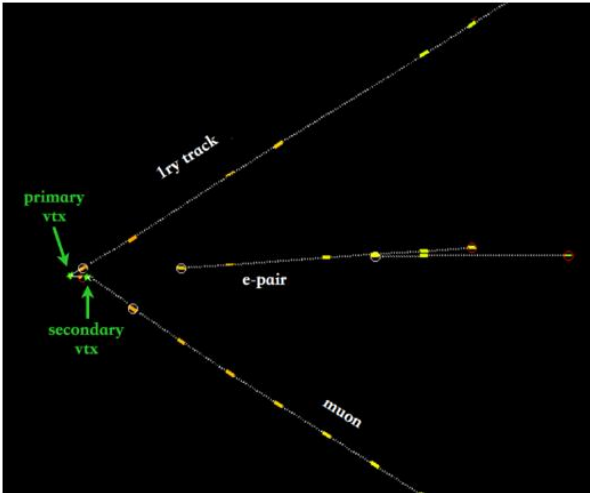
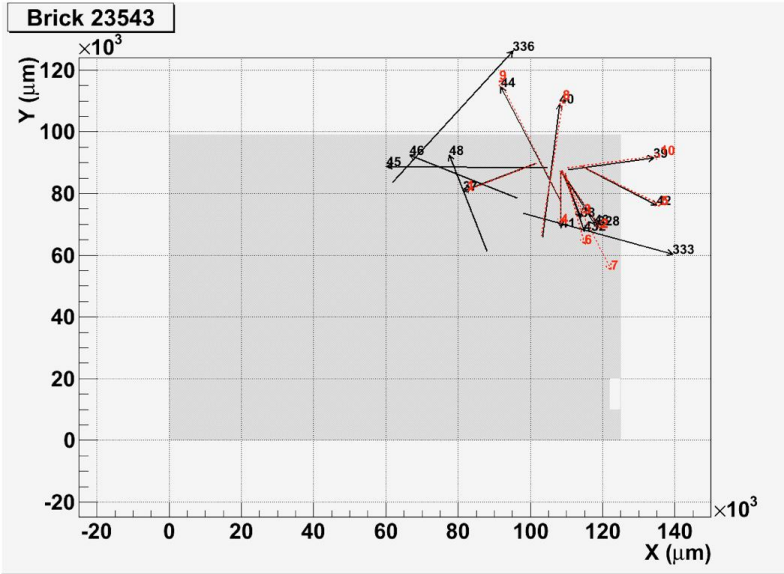
EventID:12123032048 BrickID:23543

Вид целеуказания в электронном детекторе



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

Вид целеуказания в CS



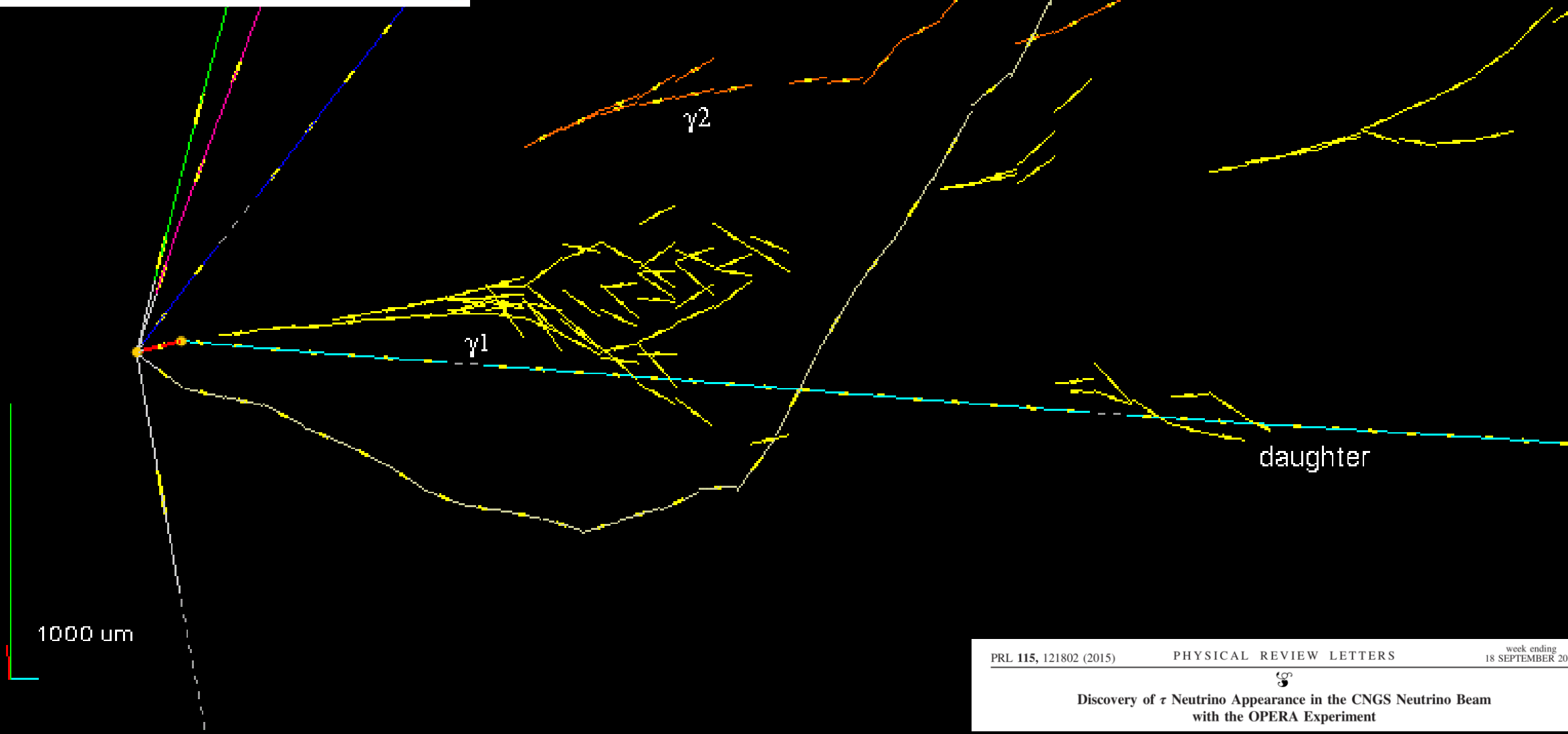
Реконструкция события



Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2015

NEUTRINO OSCILLATIONS

Super-Kamiokande's oscillation results were later confirmed by the detectors MACRO [55] and Soudan [56], the long-baseline accelerator experiments K2K [57], MINOS [58] and T2K [59] and more recently also by the large neutrino telescopes ANTARES [60] and IceCube [61]. Appearance of tau-neutrinos in a muon-neutrino beam has been demonstrated on an event-by-event basis by the OPERA experiment in Gran Sasso, with a neutrino beam from CERN [62].



Эксперимент OPERA

Для сканирования эмульсионных пластин эксперимента OPERA адаптировано программное обеспечение сканирующего комплекса ПАВИКОМ реализован конфигурационный файл `scan_OPERA.cgf`, учитывающий специфику эксперимента: геометрический размер и толщины эмульсионных пластин, размер проявленного зерна, загруженность эмульсионного слоя, коэффициент усадки и т.д.

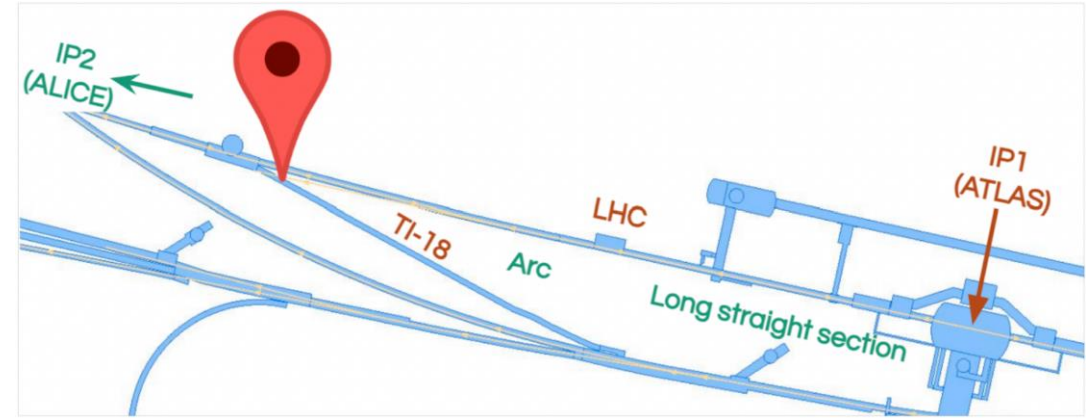
В ФИАН с помощью сканирующей станции ПАВИКОМ-3 отсканировано более 60 эмульсионных “кирпичей”, проведены реконструкция вершин взаимодействия и физический анализ полученных экспериментальных данных. Все отсканированные в ФИАН кирпичи занесены в единую базу данных эксперимента OPERA в CERN.

Открытие осцилляций мюонных нейтрино в таонные со статистической значимостью $6,1\sigma$ на основе наблюдения десяти ν_τ событий стало главным результатом эксперимента

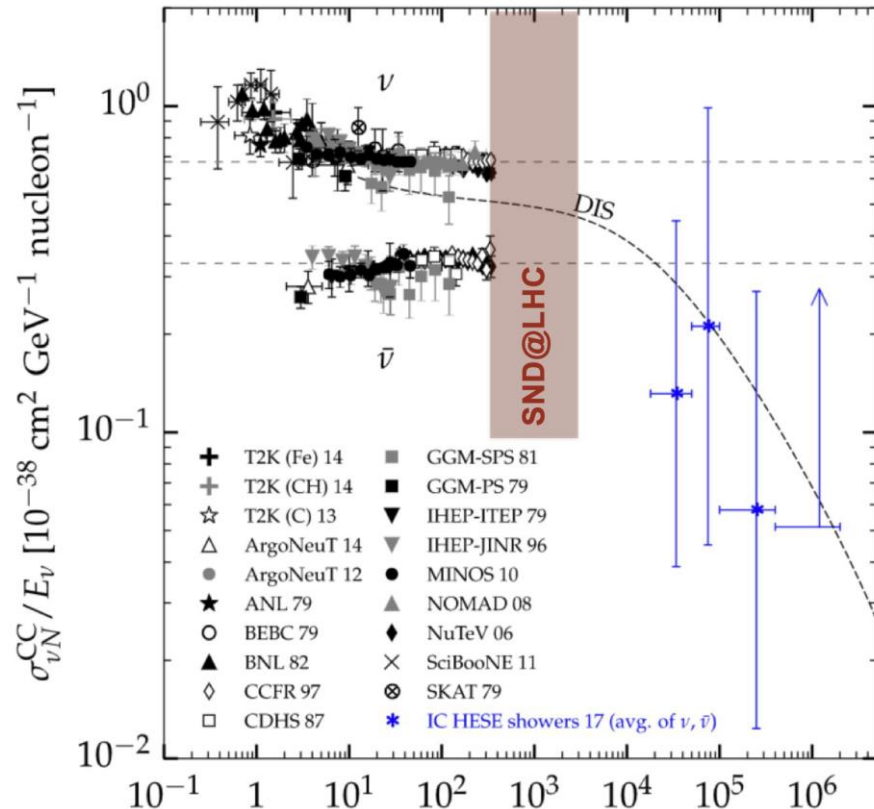
Эксперимент SND@LHC

SND@LHC – это автономный эксперимент на основе компактного гибридного детектора для регистрации нейтрино, возникающих в рр-столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 13,6$ на Большом адронном коллайдере.

Детектор позволяет различать взаимодействия всех трех ароматов и исследовать процесс рождения очарованных частиц в области псевдобыстрот $7,2 < \eta < 8,6$.



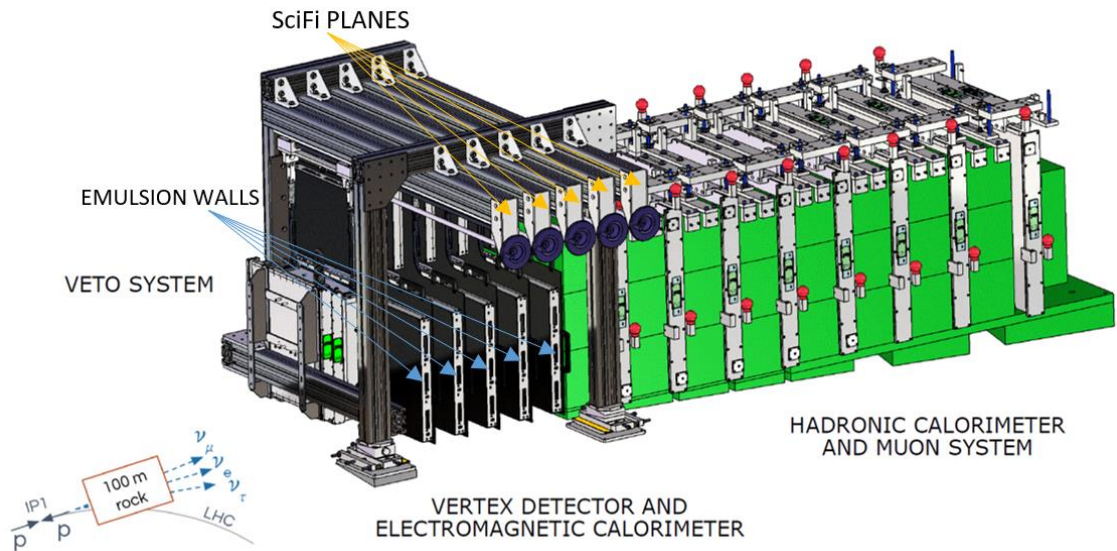
PRL 12 (2019) 041101



Детектор SND@LHC был смонтирован в 2021 году во время длительной профилактической остановки LHC, а его экспозиция началась во время 3-го запуска ускорителя (LHC RUN3) в апреле 2022 года.

Компактный детектор расположен в подземном тоннеле Tl18 на расстоянии 480 м от точки столкновения встречных пучков ATLAS IP (Interaction Point). Положение детектора SND@LHC было выбрано исходя из ожидаемых псевдобыстрот образующихся нейтрино, их энергетического спектра и минимизации возможного фона. Через детектор, расположенный достаточно близко к пучку LHC, проходит интенсивный, сильно коллимированный (в пределах полярных углов менее 2,5 мрад) пучок индуцированных нейтрино.

Эксперимент SND@LHC



Схематическое изображение детектора SND@LHC.

Производство ЯФ обеспечивается двумя производителями:
университет Нагойя, Япония и “Славич”, Россия

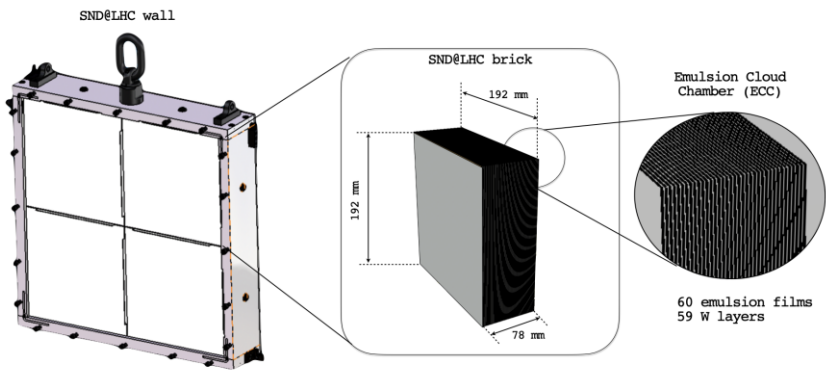
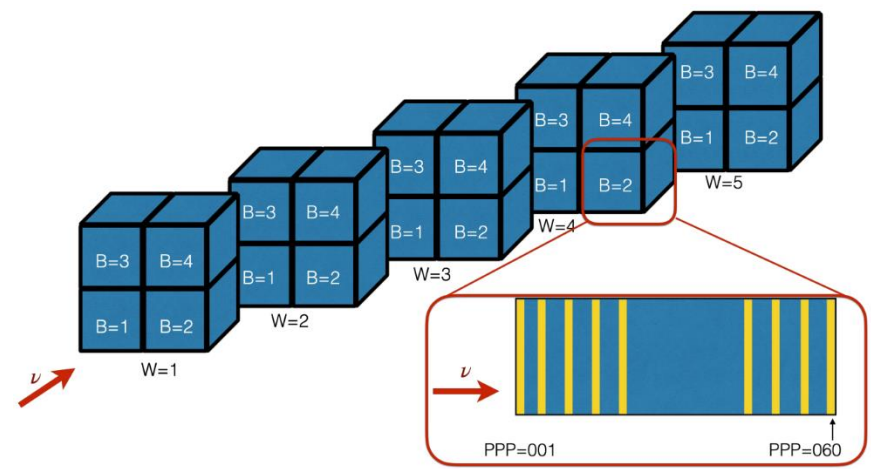
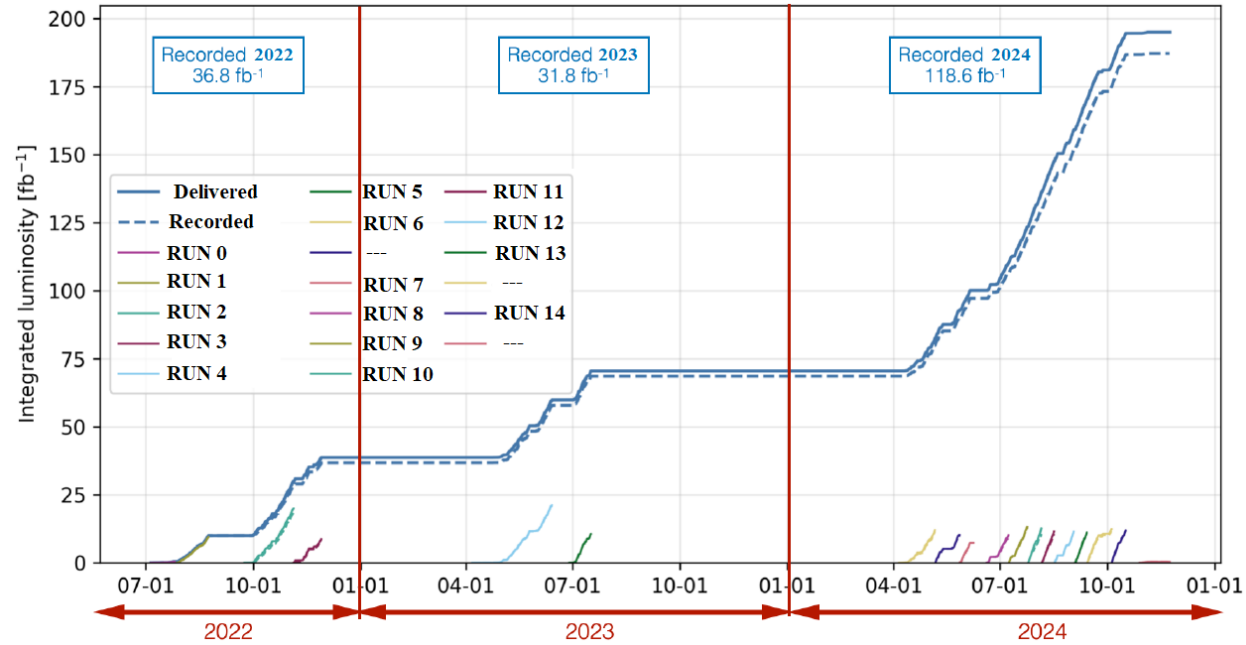
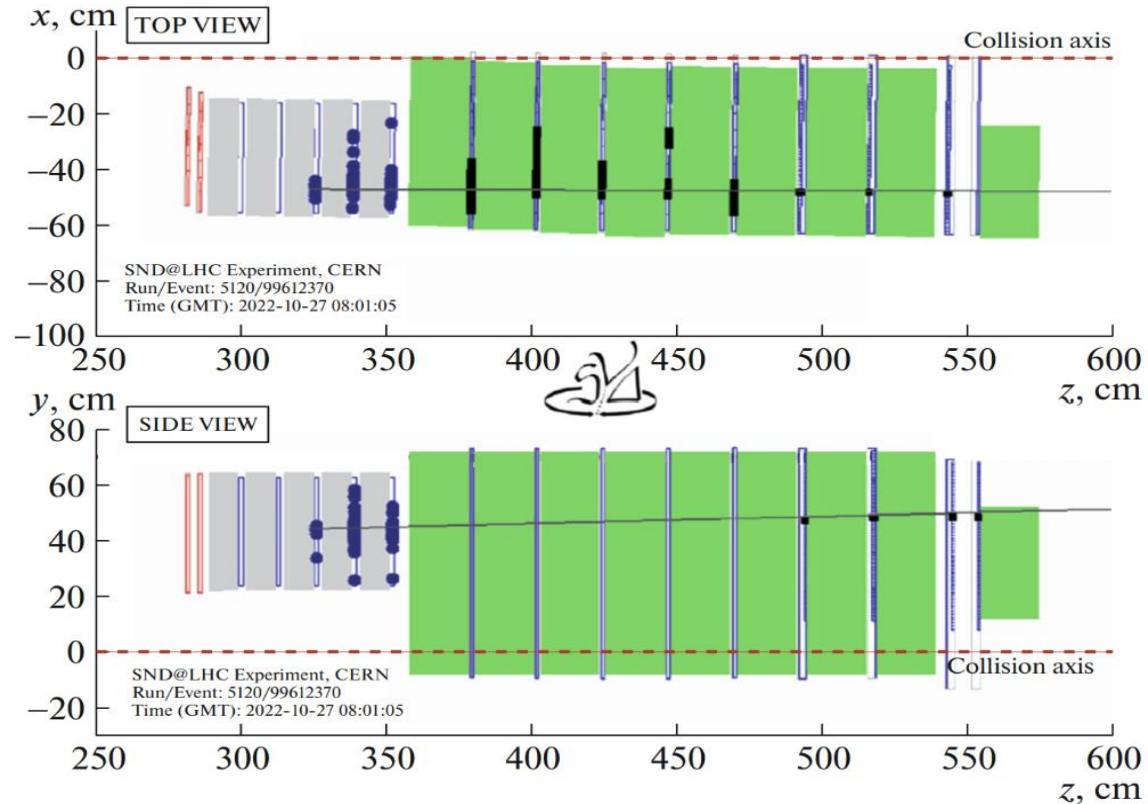


Схема одной стенки нейтринной мишени SND@LHC



1200 эмульсий 192 мм × 192 мм (~44 м²)

Пример события кандидата ν_μ по каналу заряженного тока СС



Экспериментальные результаты по данным электронных детекторов 2022 г

- 8 кандидатов ν_μ
- статистическая значимость 7σ
- суммарная интегральная светимость 36.8 fb^{-1}

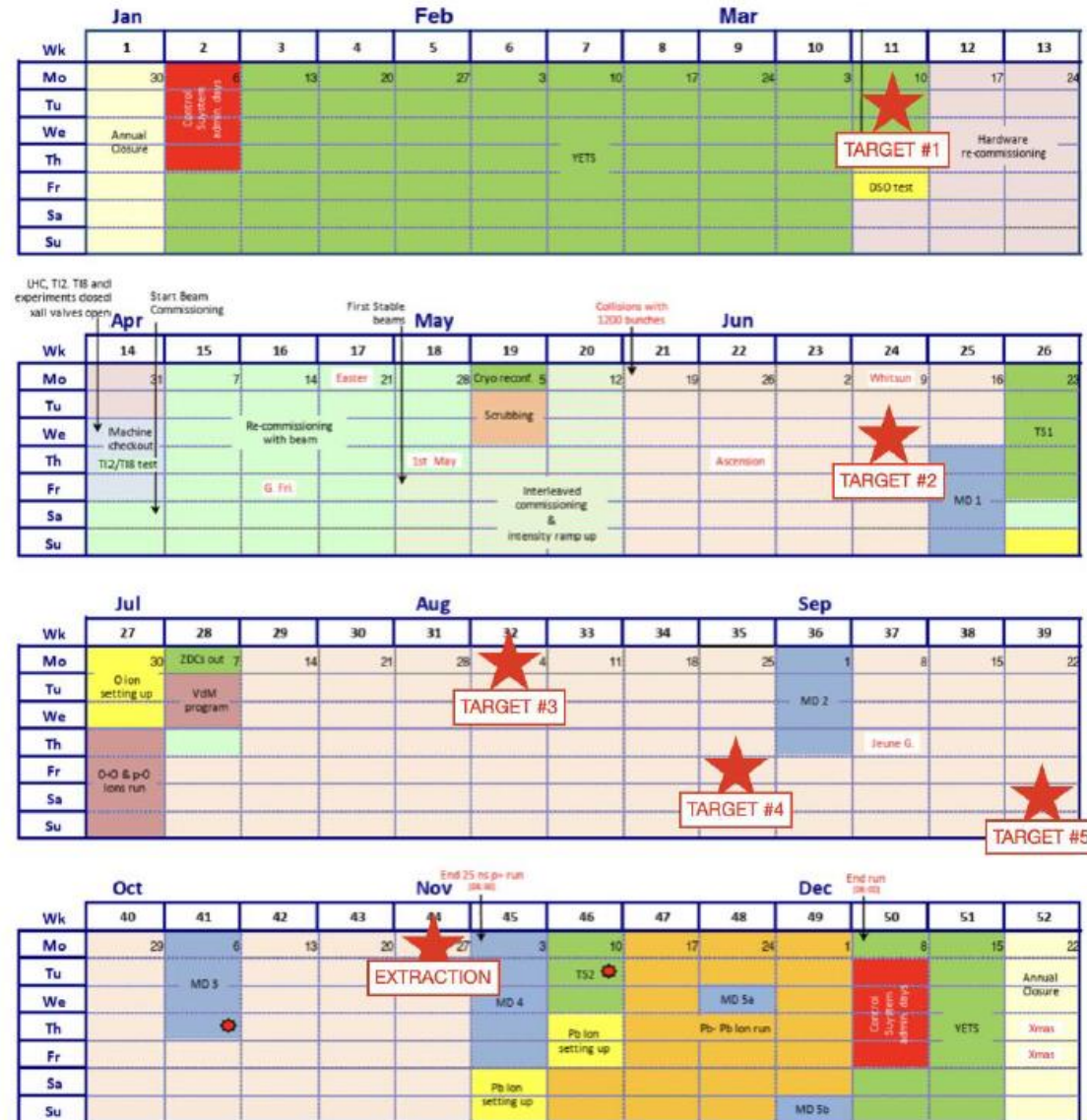
Утвержденный график LHC RUN3 на 2025 год для SND@LHC

Прогнозируется 138 дней работы
pp run (> 1200 bunches)

<https://edms.cern.ch/ui/file/2873506/1.0/2025-LHC-V1.0.pdf>

Ожидаемая суммарная интегральная
светимость за 5 сеансов 110 фб⁻¹

5 полных загрузок
нейтринного детектора ~220 м²



Методика мюнографических экспериментов на основе эмульсионных детекторов

Проникающая способность мюонов

Интенсивность

10000

частиц на
квадратный метр в
минуту

Мюоны способны пересекать сотни метров
скальных пород с поглощением,
соответствующим толщине проходимого
ими вещества

Поток атмосферных мюонов представляет
собой проникающую компоненту
космических лучей

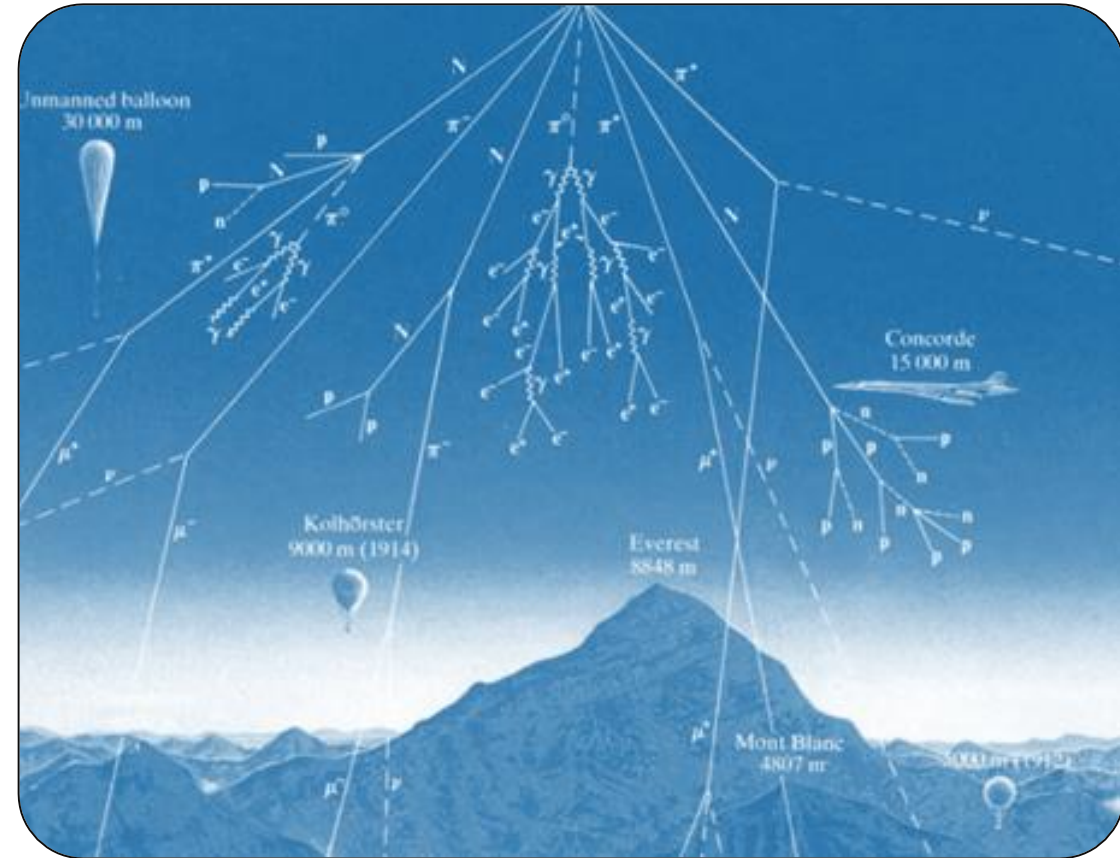
Максимальная глубина, на
которой регистрировались
мюоны наиболее высокой
энергии, составляет

2 км

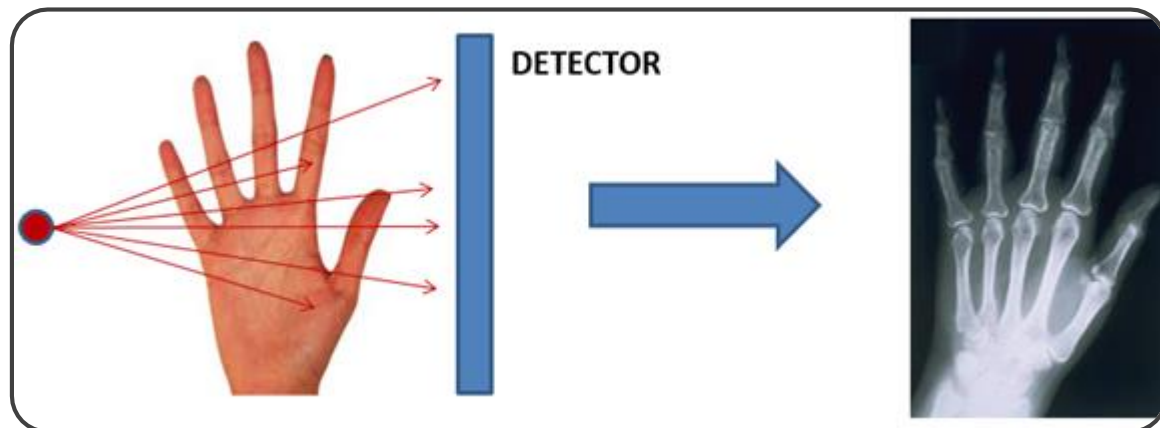
скального грунта

Мюонография может применяться
для объектов даже километрового
размера, расположенных
обязательно выше (или сбоку)
детектора

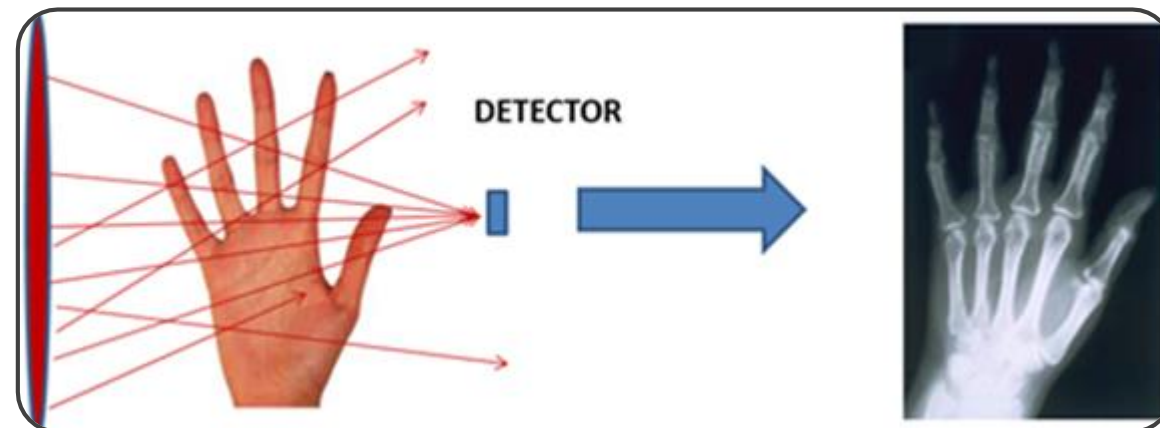
Высокая проникающая способность атмосферных мюонов в сочетании с прямо пропорциональным плотности вещества коэффициентом поглощения при умеренных энергиях (десятки и сотни ГэВ) делает проникающую компоненту космических лучей удобным средством для неинвазивного исследования крупных природных и промышленных объектов



РЕНТГЕНОГРАФИЯ



МЮОНОГРАФИЯ



Поглощение пучка при прохождении через вещество

- Точечный источник
- Размер детектора эквивалентен или равен размеру исследуемого объекта
- Рентгеновские лучи проходят несколько см материи
- Изменение плотности в исследуемом объекте преобразуется в изменение изображения в детекторе

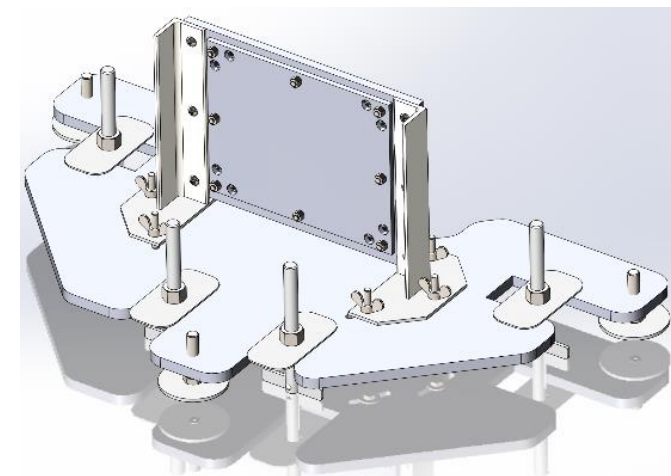
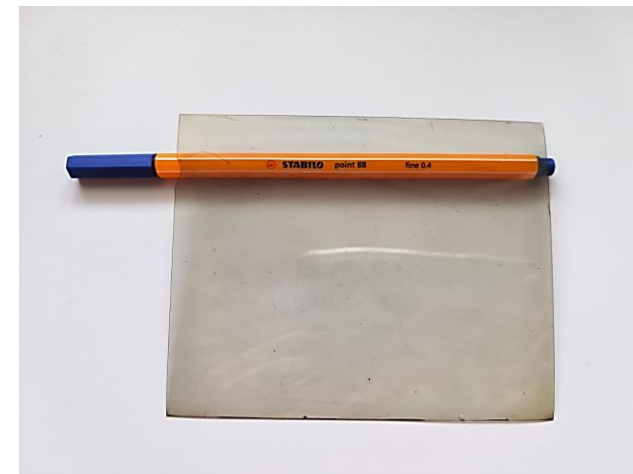
- Распределенный источник излучения
- Точечный детектор по отношению к размеру исследуемого объекта
- Проникающая способность: км материи, крупные объекты
- Изменение плотности в исследуемом объекте преобразуется в изменение интенсивности потоков мюонов в детекторе

Использование фотоэмульсий в качестве трекового детектора

Эмульсионные детекторы обладают рядом преимуществ, к которым относятся, в частности:
высокое пространственное (<1 мкм) и угловое (~ 1 -2 мср) разрешение,
большая информационная емкость,
небольшие размеры (~ 1 м² и менее),
удобство транспортировки и простота эксплуатации в сложных условиях.

Важнейшими преимуществами фотоэмульсий являются также их независимость от источников энергоснабжения,
отсутствие необходимости электронной считывающей системы в процессе экспозиции.

Исследование природных и промышленных объектов методом мюонной радиографии с целью определения в них нарушений внутренней структуры происходит без разрушения исследуемых образцов.



Планирование эксперимента

Сканирование пластин проводится в два этапа

1. Перед сканированием всех пластин отдельного детектора предварительно сканируется $1 - 2 \text{ см}^2$ на одной из пластин, входящих в данный детектор.

2. На основе загруженности пластины (число треков на единицу площади) устанавливаются параметры, которые будут использоваться для сканирования и реконструкции всего детектора.

Данная процедура проводится для каждого отдельно взятого детектора.

ШАГ 1

предварительные расчеты и оценка размеров ресурсов

ШАГ 2

изготовление требуемого количества эмульсии компанией “СЛАВИЧ”

ШАГ 3

подготовка эмульсионных пластин, изготовление конструкции детектора, сборка

ШАГ 4

экспозиция детекторов, геодезические измерения

ШАГ 5

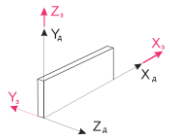
демонтаж детекторов, проявка эмульсии компанией “СЛАВИЧ”

ШАГ 6

сканирование пластин

Планирование эксперимента

После того как все пластины детектора отсканированы, производится реконструкция треков с помощью программного пакета FEDRA (offline) на Linux машине.



Перевод в единую систему координат всех детекторов, участвующих в экспозиции и физический анализ угловых распределений потока мюонов.

Представление результатов в удобном для восприятия виде путем наложения экспериментальных данных в единой системе координат с геодезическими измерениями и лидарной съёмкой; построение 3D-модели.

ШАГ 7

реконструкция треков

ШАГ 8

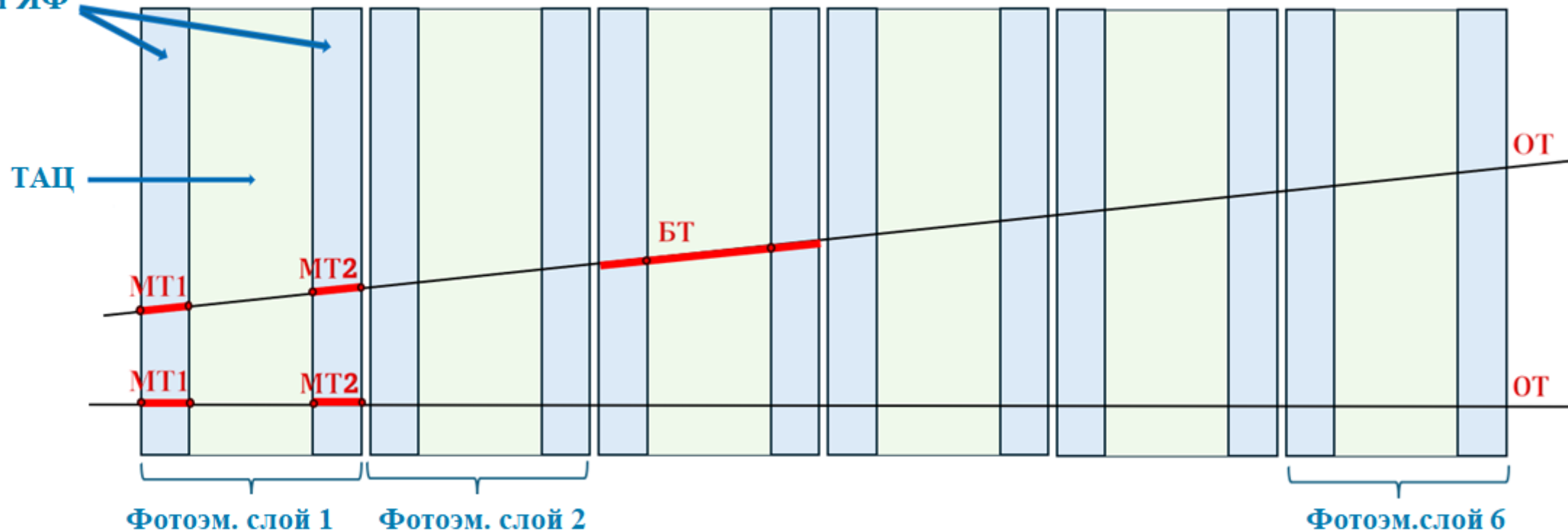
проведение комплексного анализа

ШАГ 9

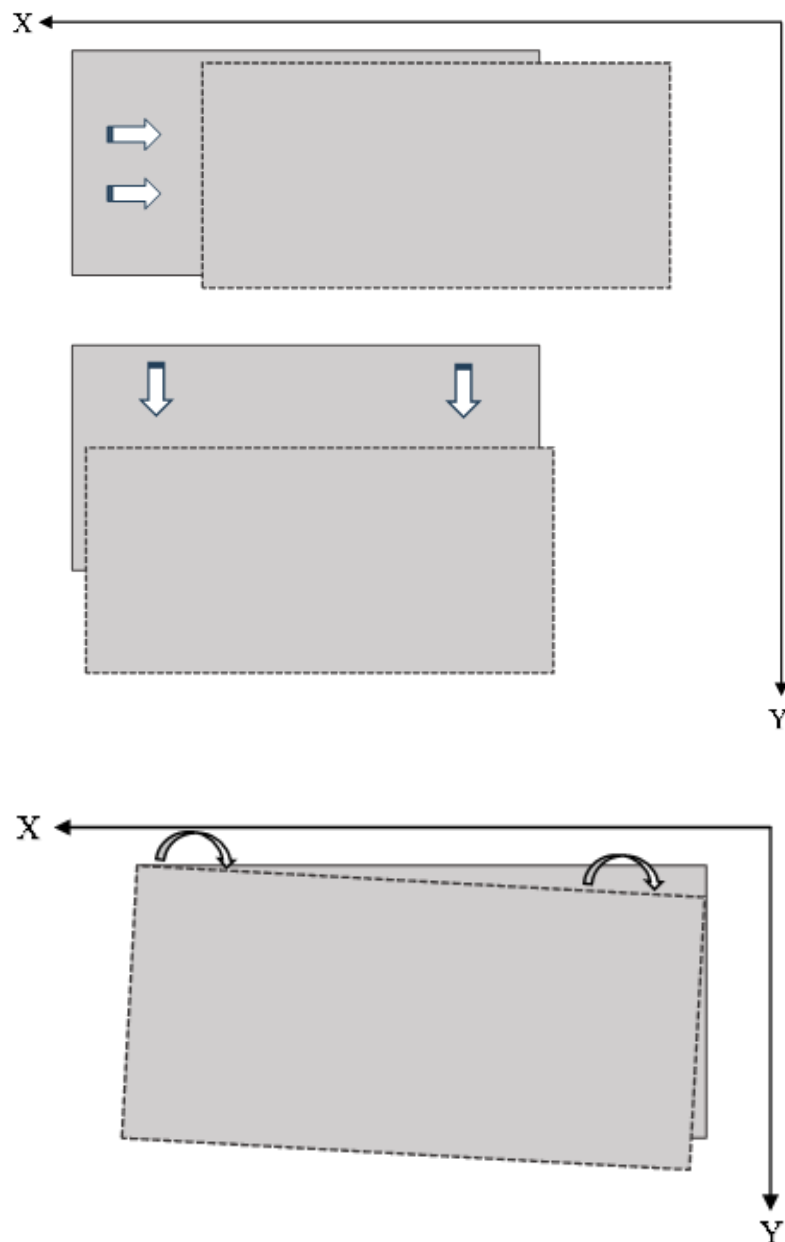
подведение итогов

Реконструкция треков в слоях фотоэмульсии

Верхний и нижний слои
двусторонней ЯФ



Реконструкция ОТ с помощью пакета FEDRA



ШАГ 1 – СМЕЩЕНИЕ

Путем итерационных смещений на небольшие расстояния в плоскости ХУ определяются параметры, при котором число реконструированных треков максимально.

Найденные параметры записываются в соответствующий конфигурационный файл 1.

ШАГ 2 – ПОВОРОТ

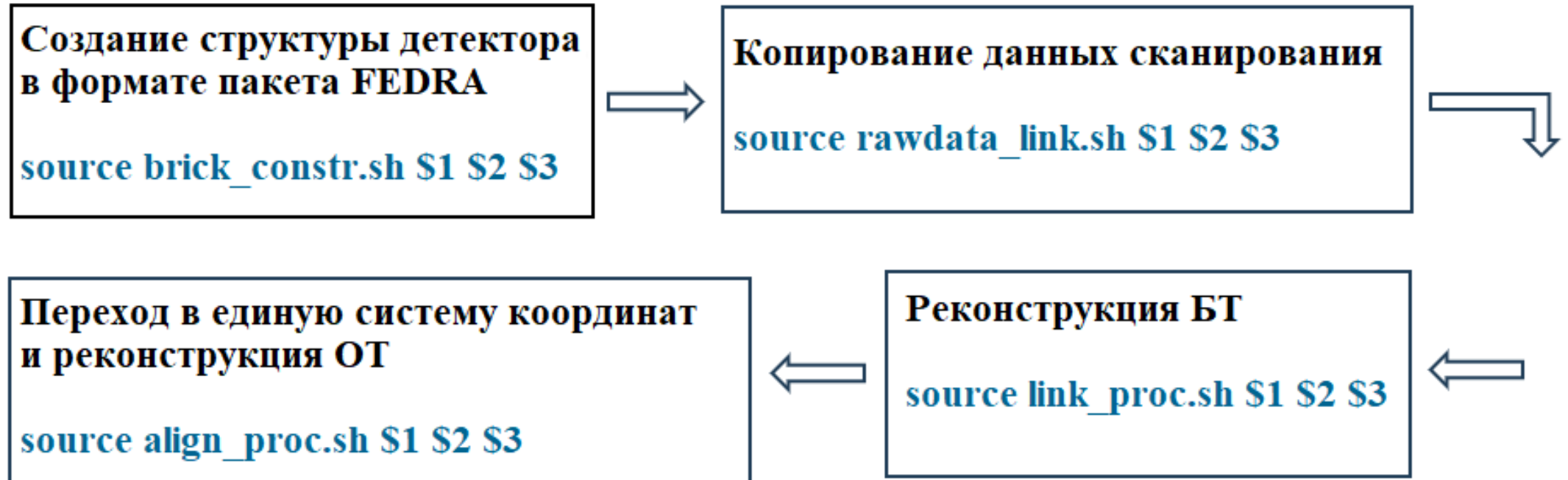
Путем последовательных итерационных смещений на небольшой угол в плоскости ХУ определяются параметры, при котором число реконструированных треков максимально.

Найденные параметры записываются в соответствующий конфигурационный файл 2.

ШАГ 3 – РЕКОНСТРУКЦИЯ ОТ

с учетом конфигурационных файлов 1-2.

Автоматическая реконструкция ОТ с помощью пакета FEDRA и bash скриптов



идентификационный номер детектора **\$1**

число эмульсионных пластин, входящих в его состав (используются два параметра:

идентификационный номер первой **\$2** и последней пластины **\$3**

Оценка минимального количества фотоэмульсионных слоев в детекторе

10 эмульсионных слоёв $10\text{ см} \times 12\text{ см}$
время экспозиции - 1 месяц

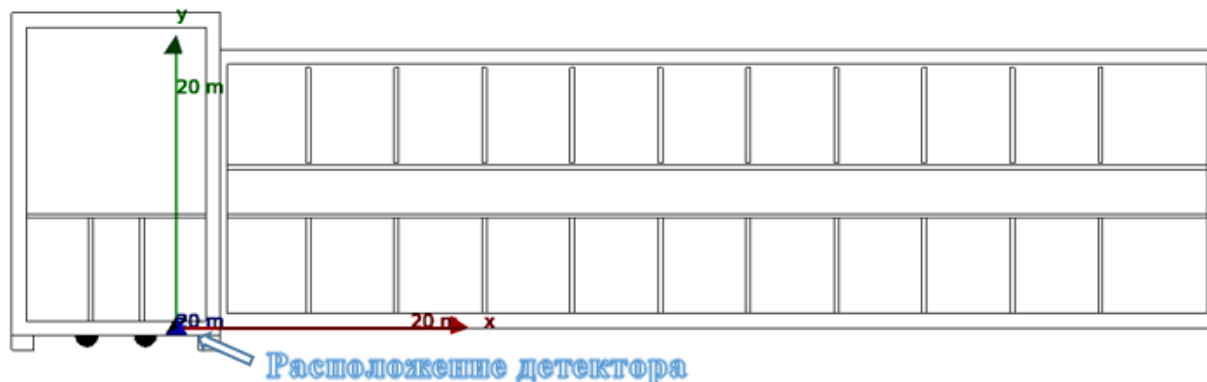


Вид с улицы на окно с детектором в лаборатории ФИАН

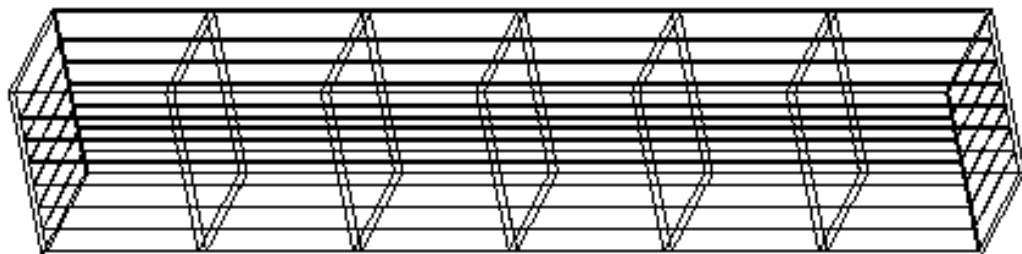


Схема проведения эксперимента, фото установки детектора

Геометрия модельного эксперимента



Модель крыла здания ФИАН (вид сверху), где расположен детектор и положение детектора на подоконнике лаборатории



Трехмерная модель «Здания 1»



Технические характеристики, заложенные при моделировании помещений ФИАН и «Здания 1»

материал с плотностью 2.650 г/см^3
внешние стены толщиной 1 м,
внутренние - 0,3 м
перекрытия (полы) и крыша - 0,3 м
расстояние от ФИАН до «Здания 1» - 20 м

Моделирование ФИАН

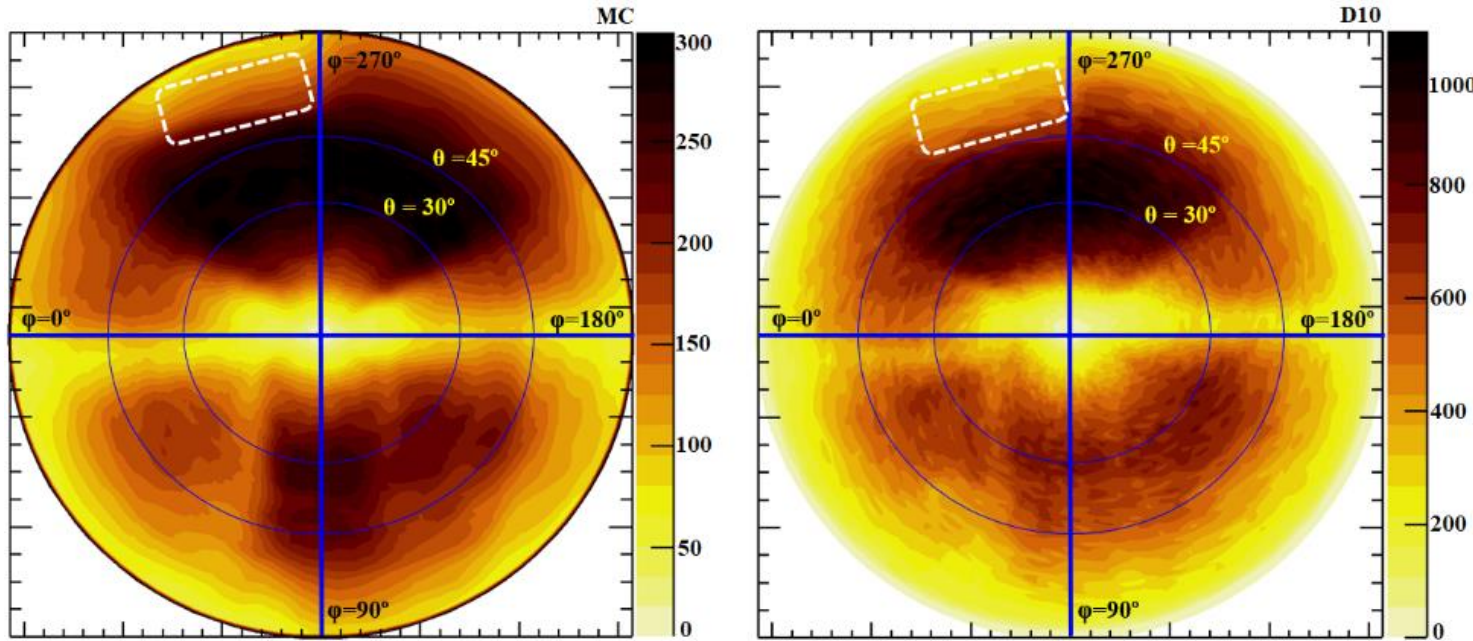
коридор ≈ 20 метров
два ряда кабинетов площадью $6 \times 6 \text{ м}^2$
со стенами между ними и вдоль коридора, полы 2-го и 3-го этажа
крыша и более широкая часть крыла, выступающая на 0,5 м
относительно остальной части крыла

Моделирование «Здания 1»

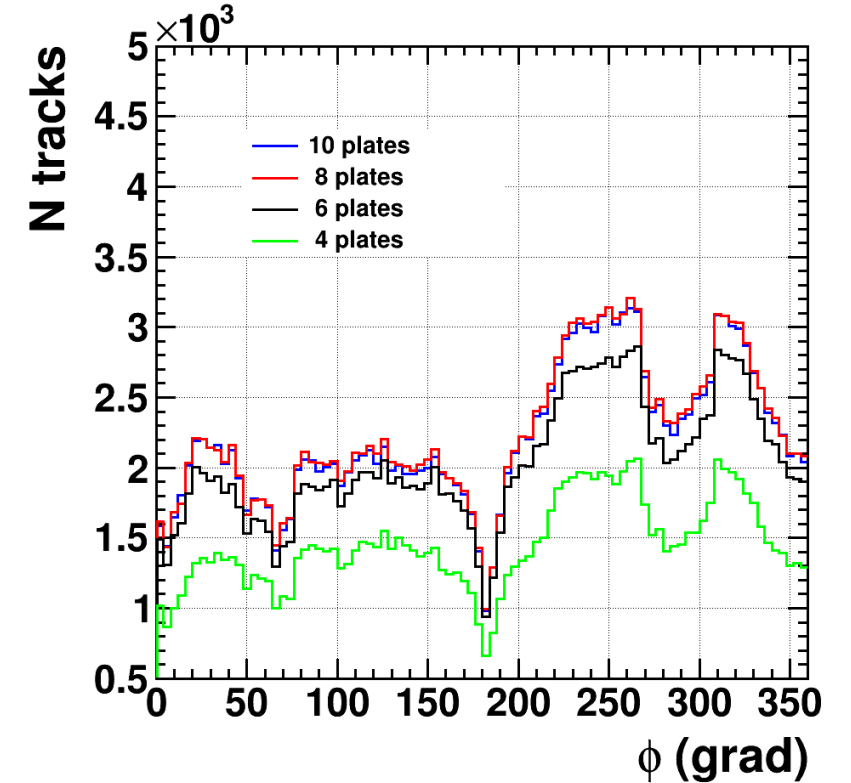
шесть перекрытий (полов) на расстоянии 3 м друг от друга,
внутри пять стен

Моделирование и экспериментальные результаты

Каждый трек характеризуется угловыми переменными θ и φ ,
где θ - зенитный угол (меняется от 0 до 75 градусов, ограничения сканирующей системы),
 φ - азимутальный угол (меняется от 0 до 360 градусов)



$\varphi = (270^\circ \div 300^\circ)$ и $\theta = (40^\circ \div 60^\circ)$ → уменьшение потока мюонов
при прохождении через «Здание 1»

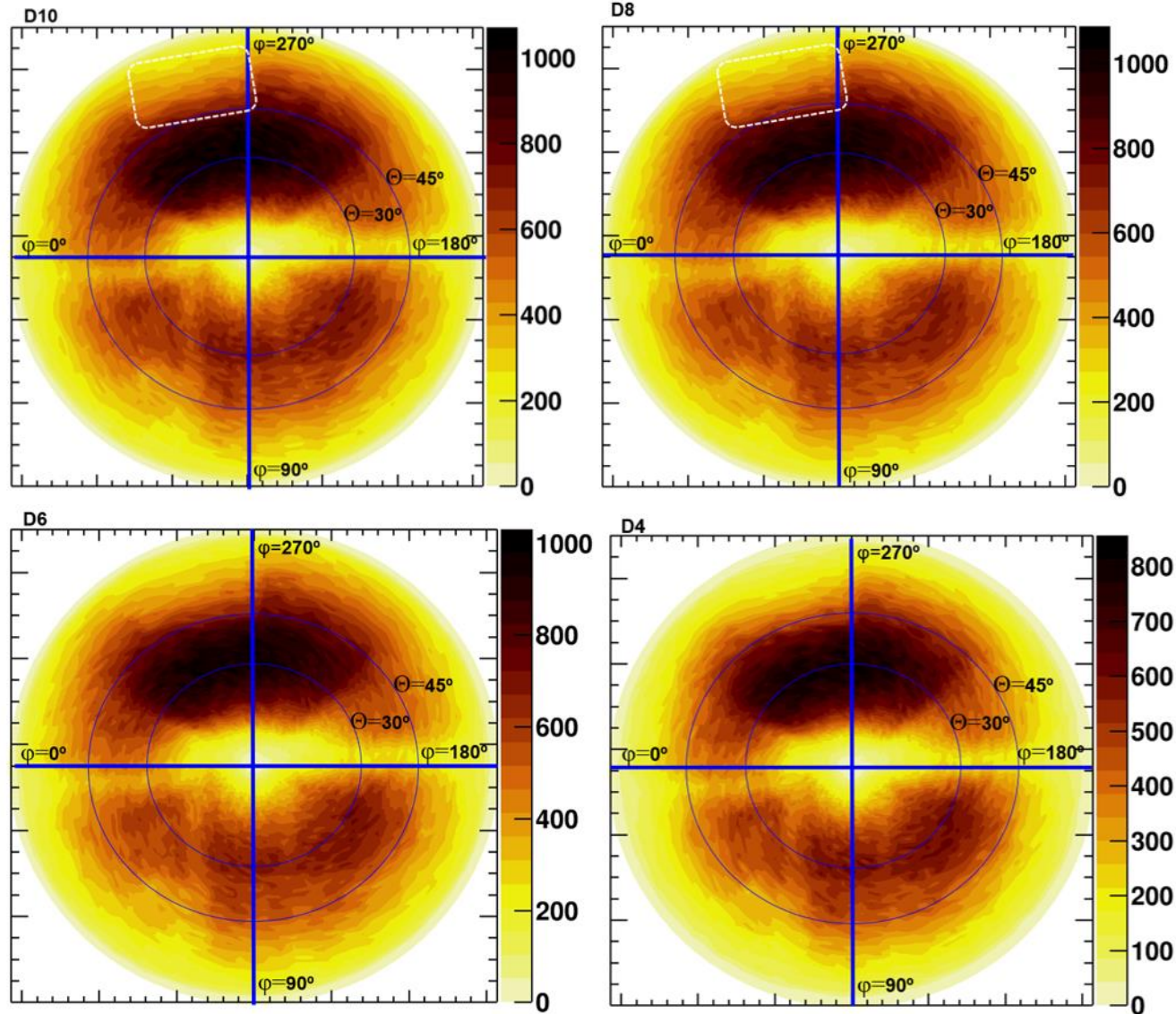


$\varphi \sim 60^\circ$ внутренняя вертикальная стена ФИАН

$\varphi \sim 180^\circ$ горизонтальная стена ФИАН

$\varphi \sim (270^\circ - 300^\circ)$ провал от «Здания 1»

Экспериментальные результаты реконструкции треков в наборах из 10, 8, 6, 4 идущих подряд пластин



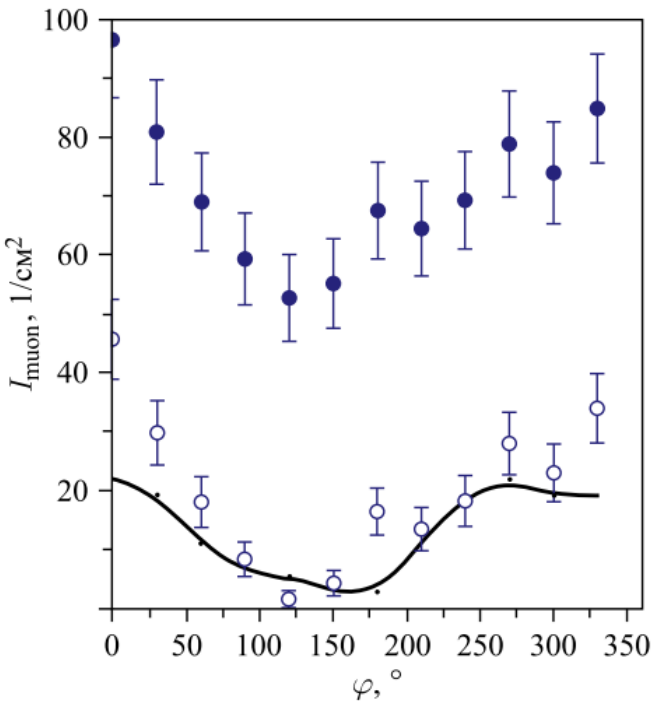
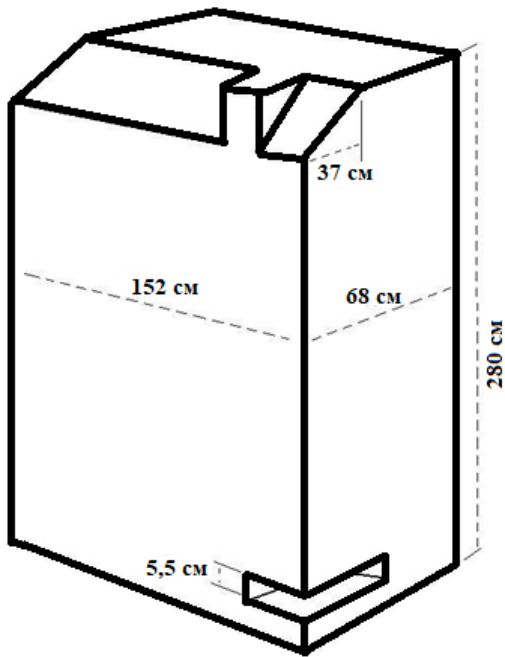
Для исследования объектов,
находящихся под большими углами к детектору
 $45^\circ < \theta < 75^\circ \rightarrow$ **6 эмульсионных слоев**

для объектов под малыми углами
 $\theta < 45^\circ \rightarrow$ **4 эмульсионных слоя**

Мюонографические исследования в России крупных природных и промышленных объектов на основе эмульсионных детекторов

Тестовые эксперименты

Объект наблюдения - стальная колонна весом 23 тонны (ядро магнита циклотрона НИИЯФ МГУ)



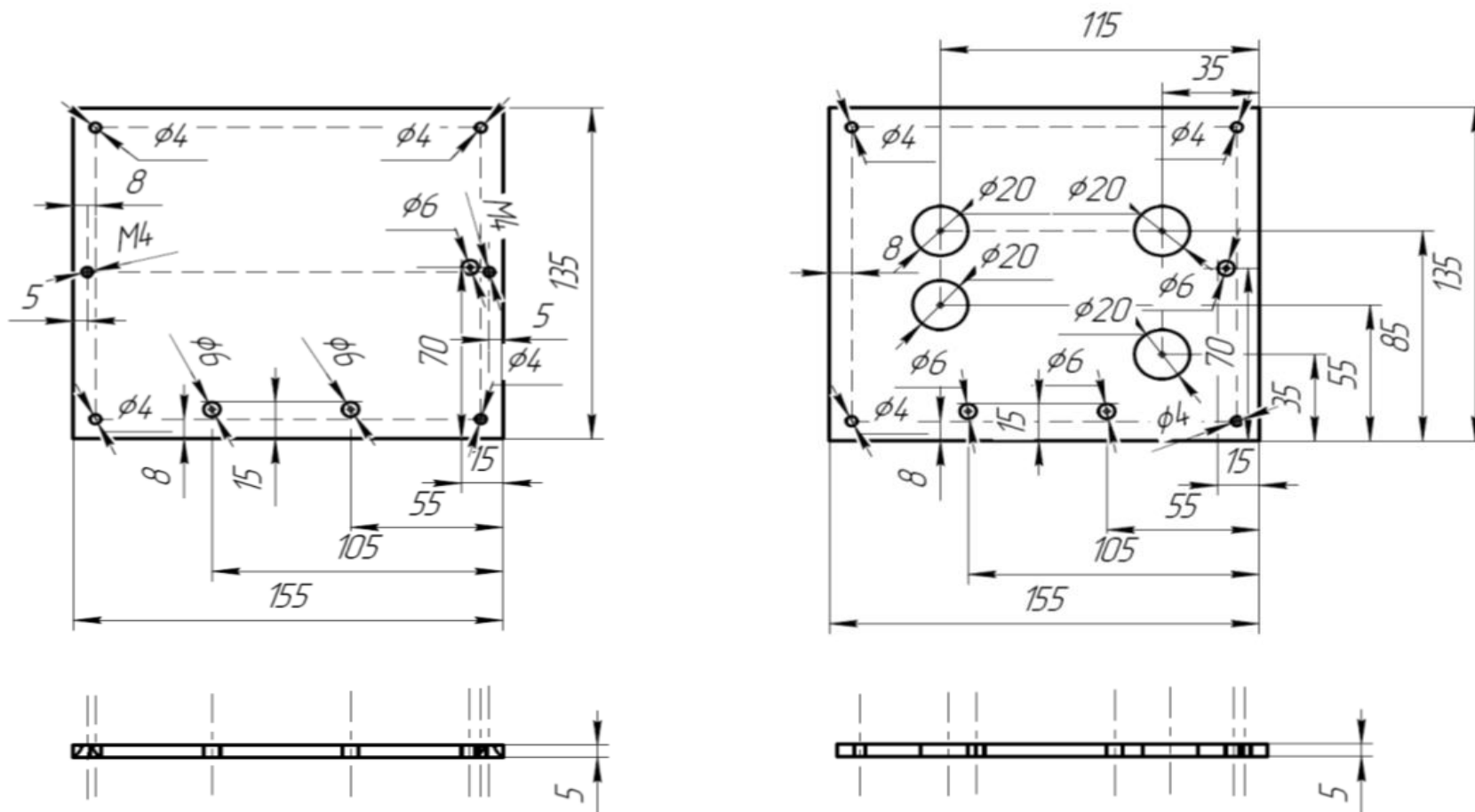
сплошная кривая – расчет,
заштрихованные кружки – эксперимент без вычета фона,
незаштрихованные кружки – эксперимент с вычетом фона

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

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

При $\Delta t > 0,5$ суток влияние фона существенно,
т.е. время подготовки эксперимента не должно превышать этого значения

Чертеж детектора для тестовых экспериментов



Днище и крышка детектора; диаметр фиксирующих шпилек – 6 мм, расстояние их от края – 15 мм

Тестовые эксперименты

Объект наблюдения - диски бегового барабана общим весом 40 тонн и диаметром ≈ 3 метра каждый на испытательном стенде НИИ шинной промышленности

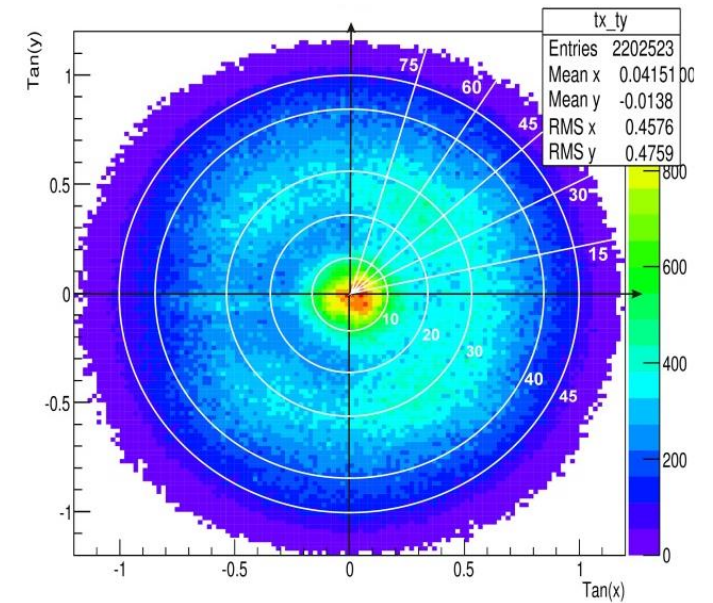
Фото испытательного стенда



Расположение детекторов на стенде



$$tx = \frac{dx}{dz} = tg\theta \cdot \cos\varphi, \quad ty = \frac{dy}{dz} = tg\theta \cdot \sin\varphi$$



Экспериментальные результаты для детектора 1 наглядно демонстрируют “тень” от бегового барабана испытательного стенда

Эксперимент в шахте геофизической службы РАН, Обнинск

Объект наблюдения – шахта лифта

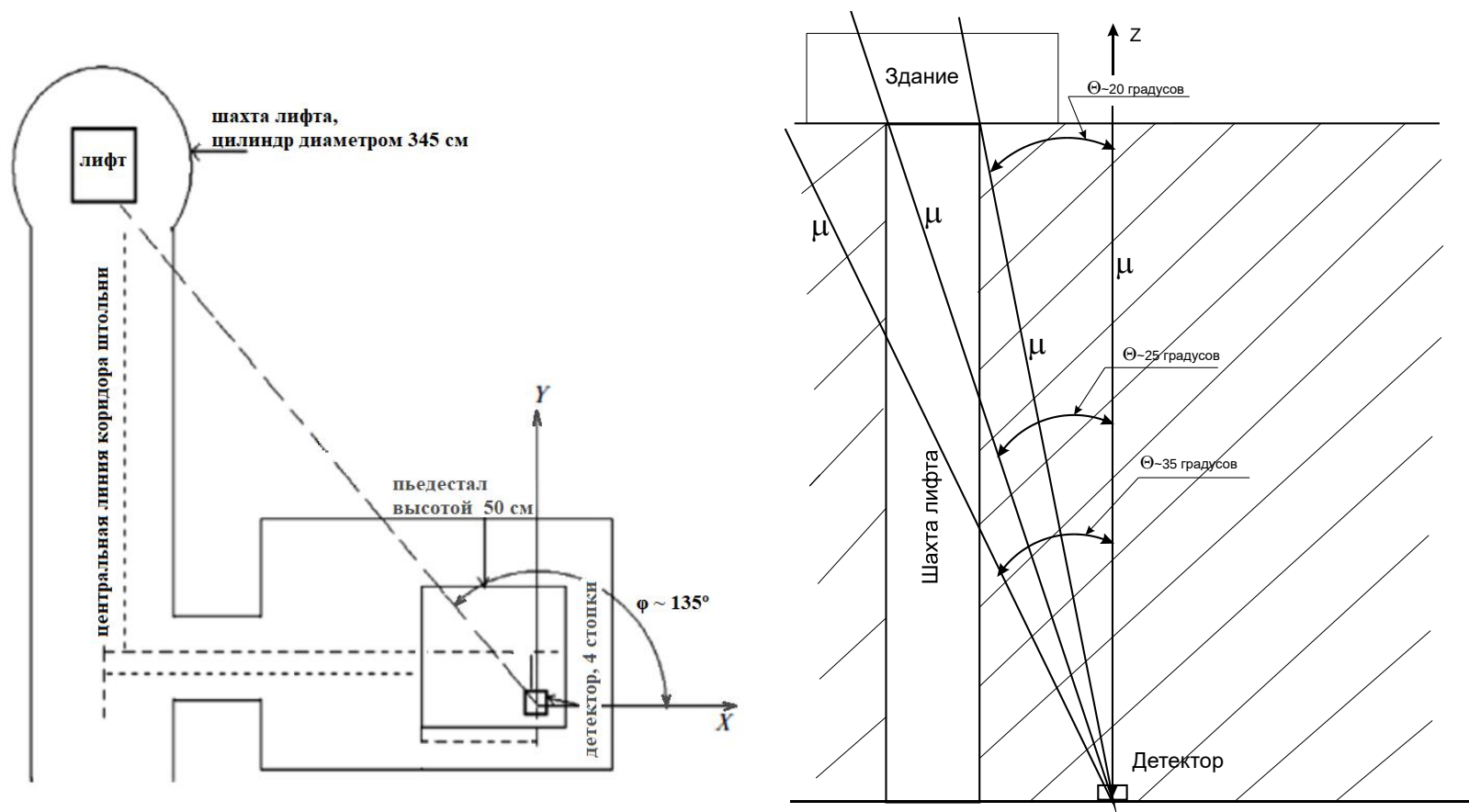


Фото четырех детекторов,
установленных под землей
на глубине 30 м

Время экспозиции 2 и 4 месяца

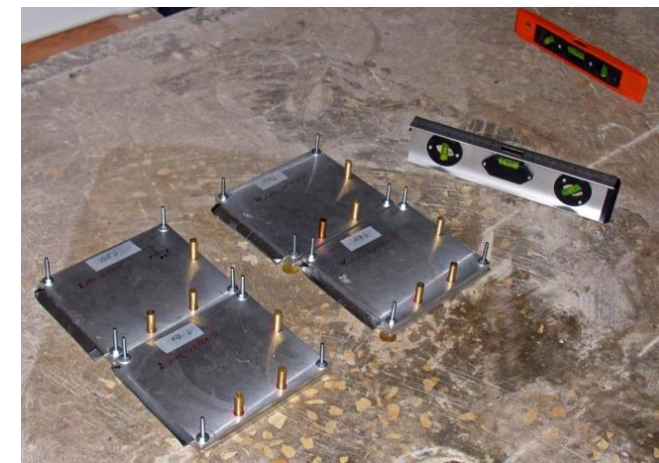
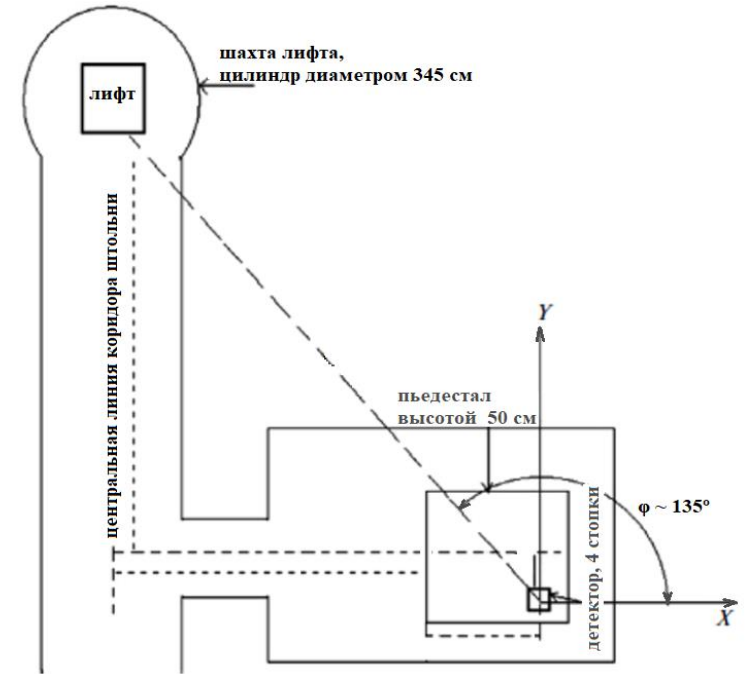
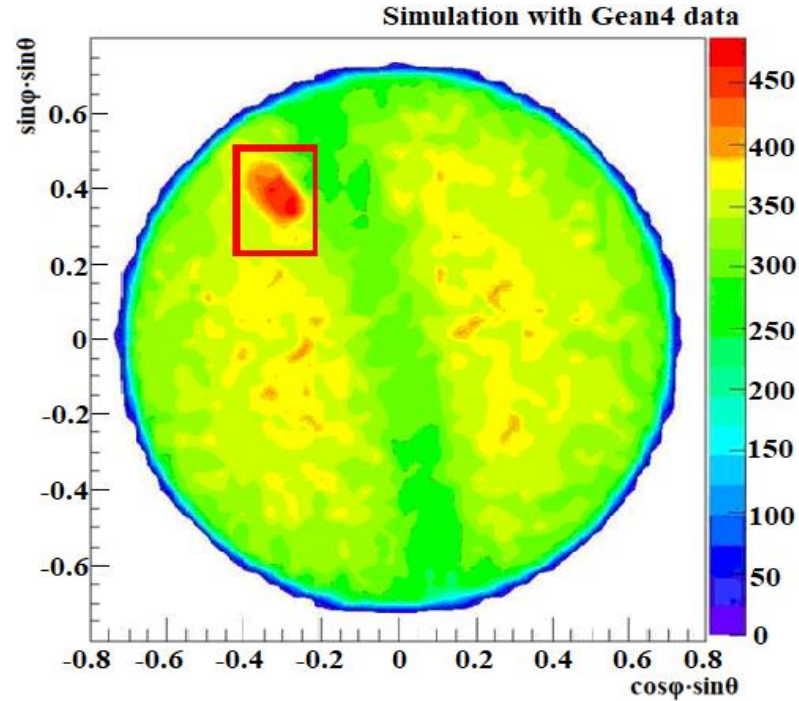
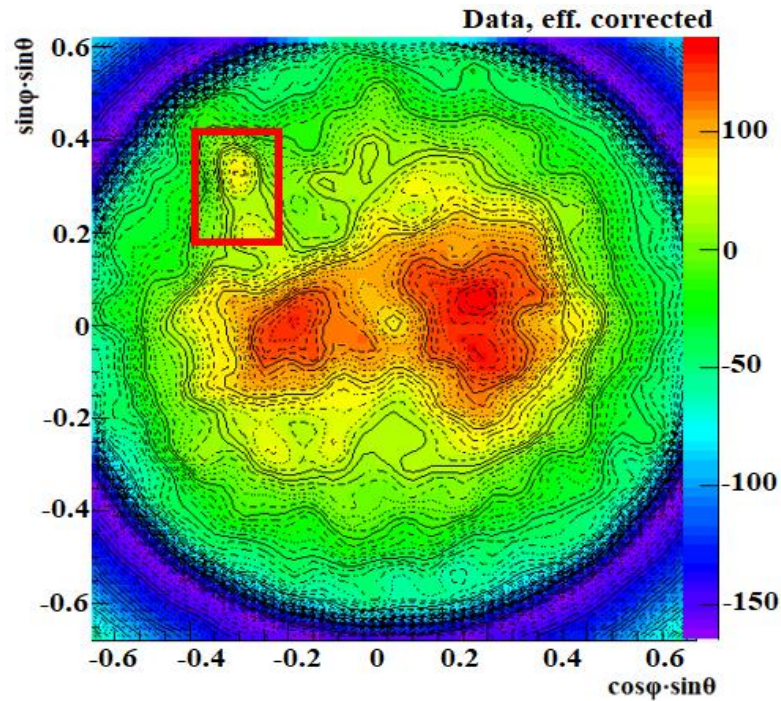


Схема эксперимента в шахте на глубине 30 м; относительное расположение шахты лифта и подземных детекторов (вид сверху), ориентация осей x и y в системе детектора.

Показан диапазон угла θ (20-35°), в котором должен наблюдаться “сигнал” от шахты.

Экспериментальные результаты



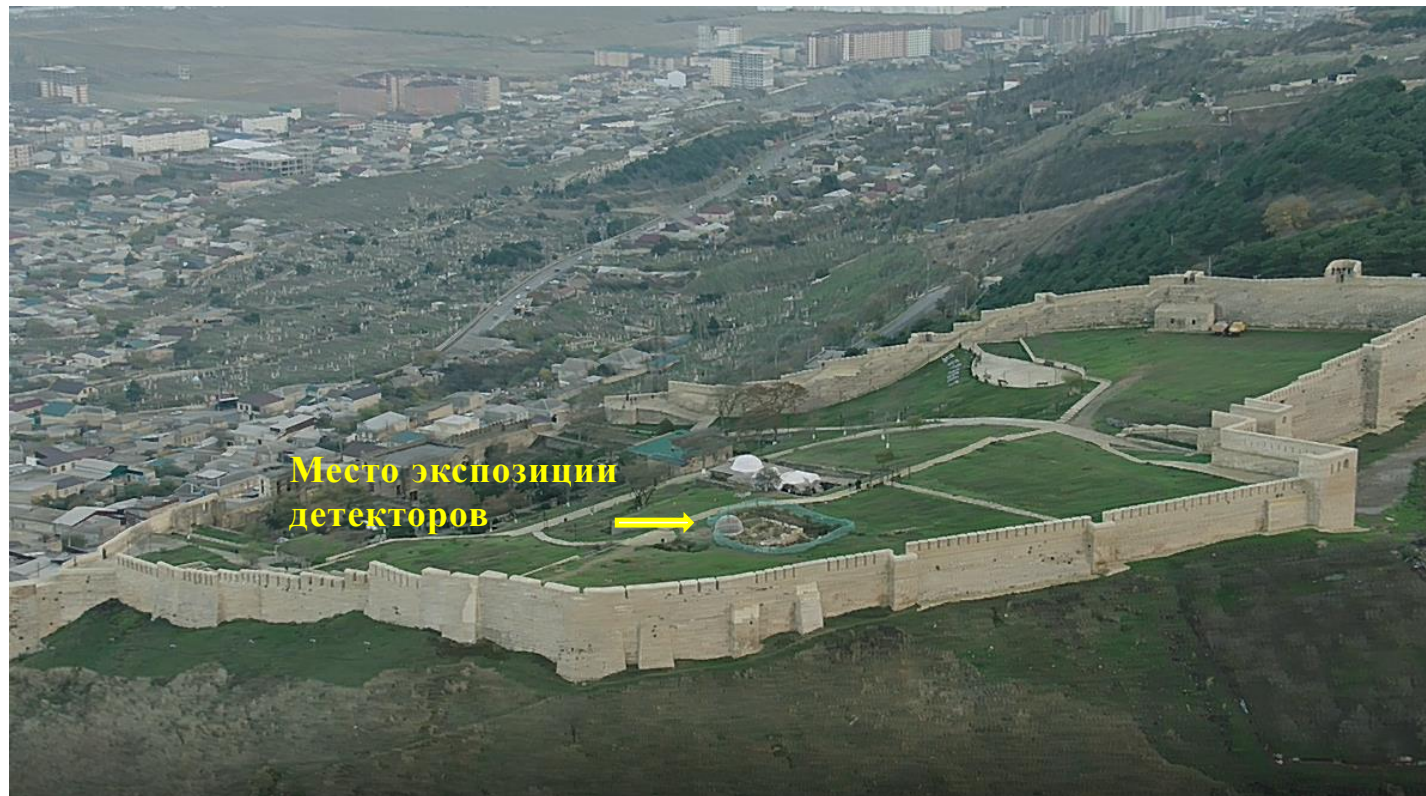
Область, соответствующая положению шахты лифта (выделена красным прямоугольником) в диапазоне углов $\varphi=132^\circ$, $\theta=27^\circ$

Распределение наглядно демонстрирует дополнительное увеличение потока мюонов поперек коридора шахты, т.к. исследуемый объект находится в линзе мраморовидного известняка, плотность которого в несколько раз отличается от плотности грунта.

Памятник всемирного наследия Юнеско, Цитадель Нарын Кала

Объект наблюдения – внутренняя структура подземного крестово-купольного сооружения

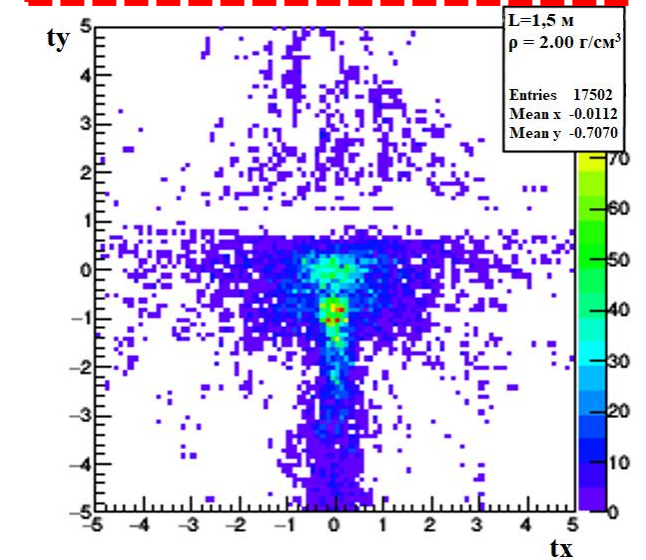
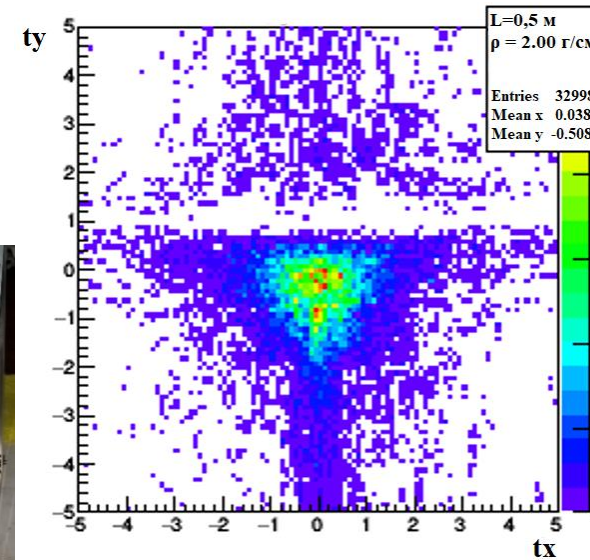
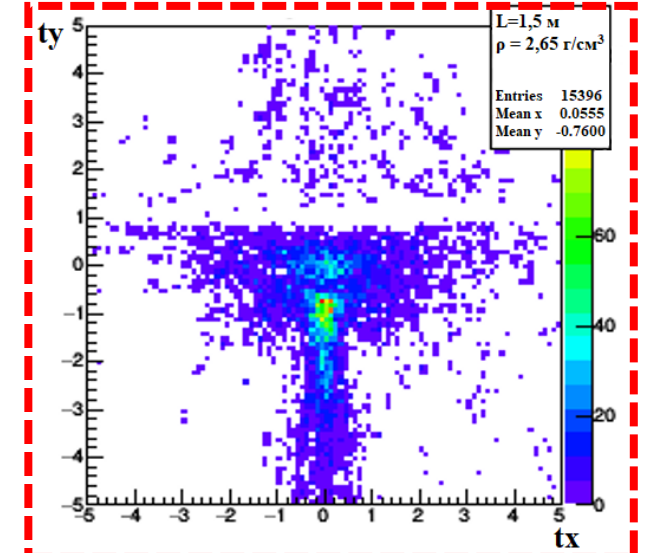
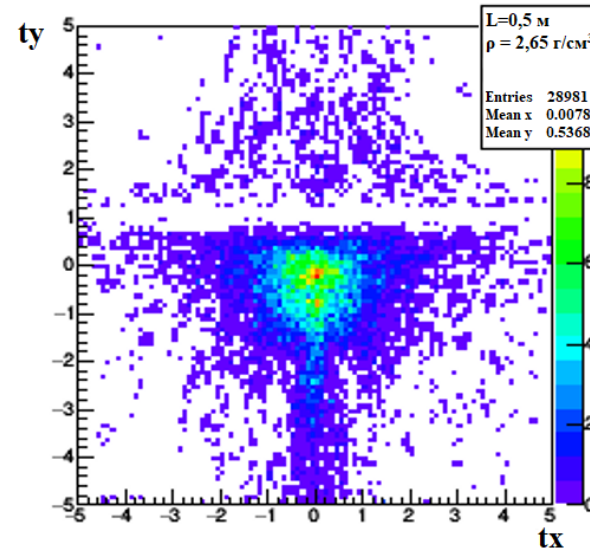
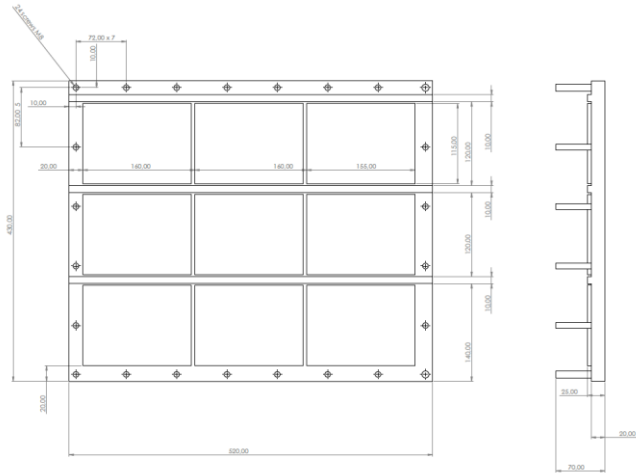
Время экспозиции ~ 2 месяца



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

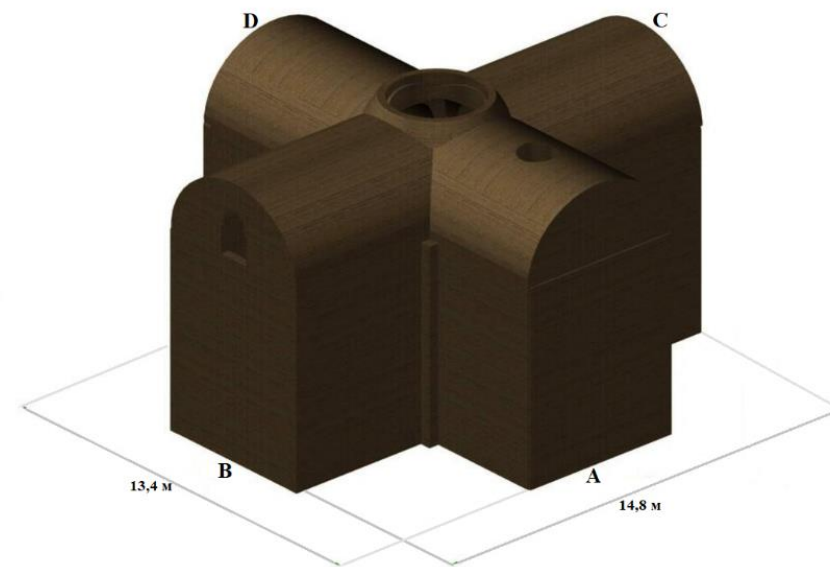
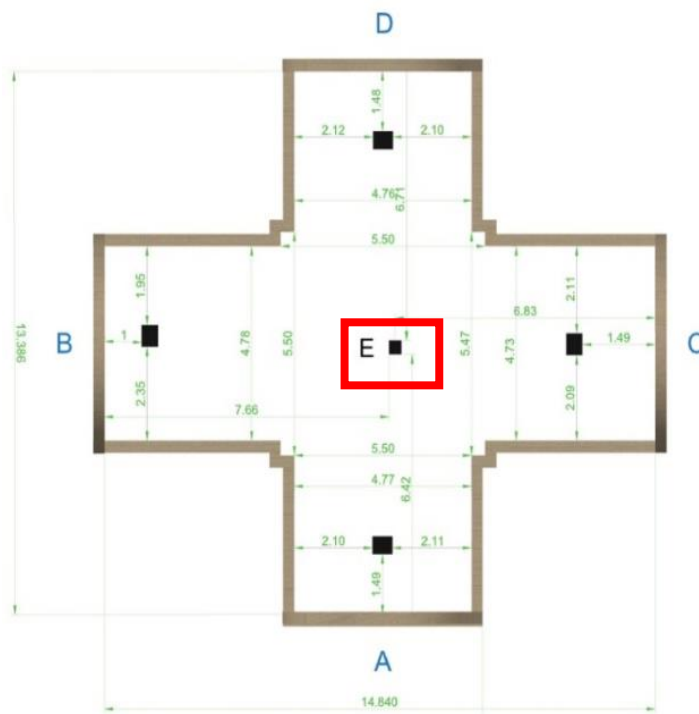
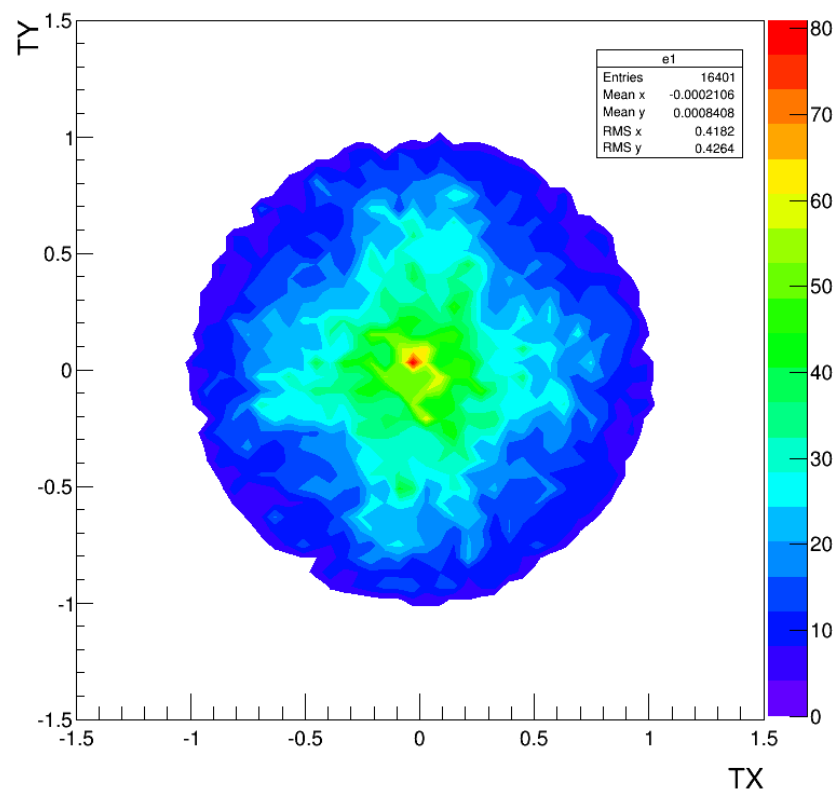
Постройка датируется IV-V в н.э. и, возможно, является древнейшим христианским сооружением на территории России.

Конструкция детекторов, моделирование эксперимента



толщина стен 0,5 м и 1,5 м материал грунта 1.78 г/см³
плотность песчаника 2.0, 2.65 г/см³

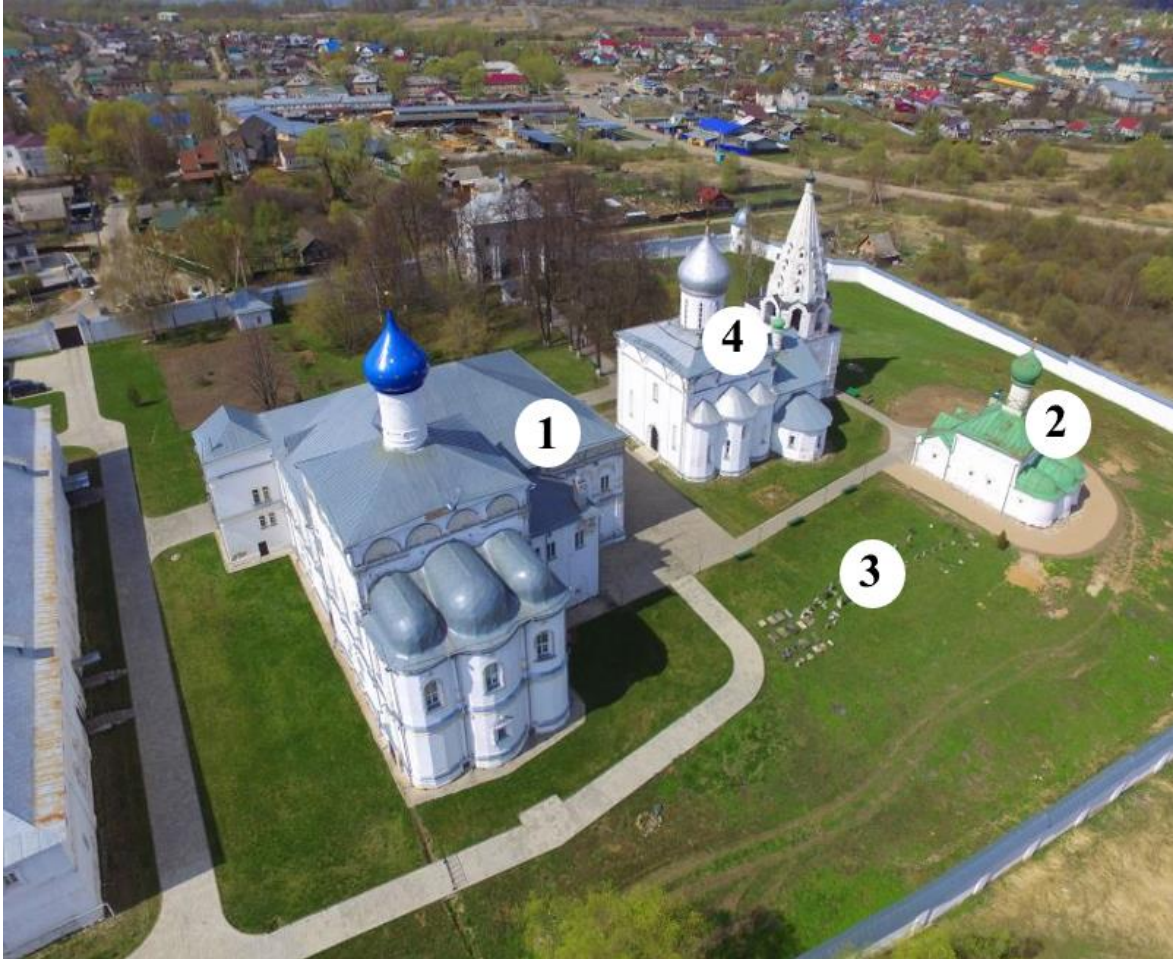
Экспериментальные результаты



Экспериментальные результаты наглядно демонстрируют крестообразную структуру исследуемого помещения

Анализ экспериментальных распределений показал соответствие с расчетными значениями при $L=1,5$ м и $\rho=2,65$ г/см³

Исследования в Свято-Троицком Даниловом монастыре



Области исследований:

1 – скрытые подвалы

Церкви Похвалы Божьей Матери (ЦПБМ)

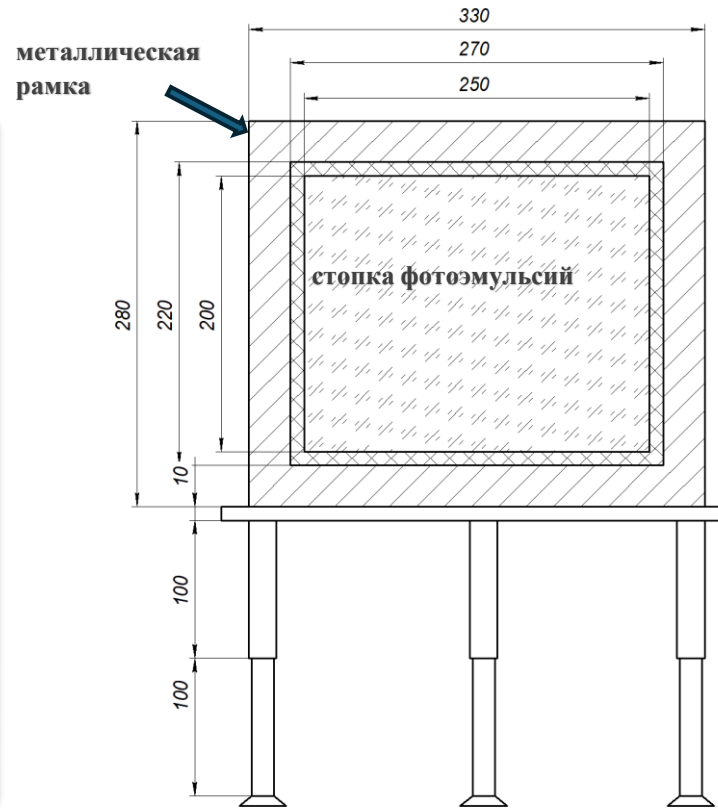
2 – остатки старого фундамента

Церкви Всех Святых (ЦВС)

3 – участок территории между зданиями церквей

4 - Троицкий собор

Конструкция детектора

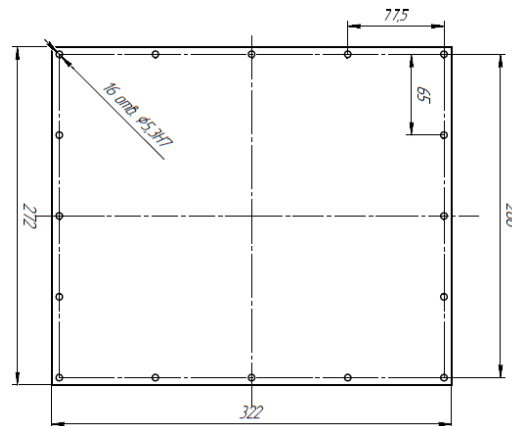
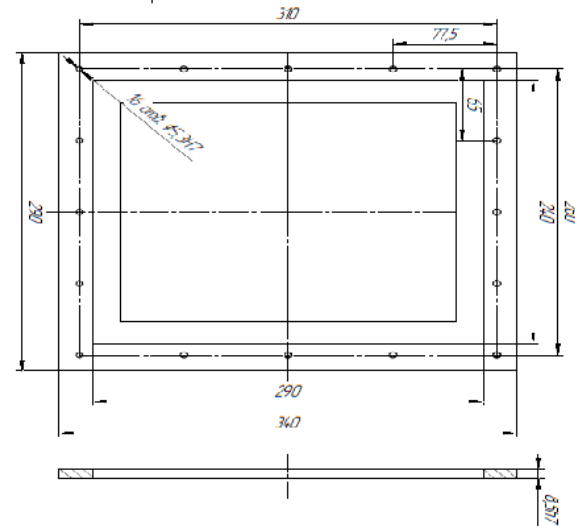
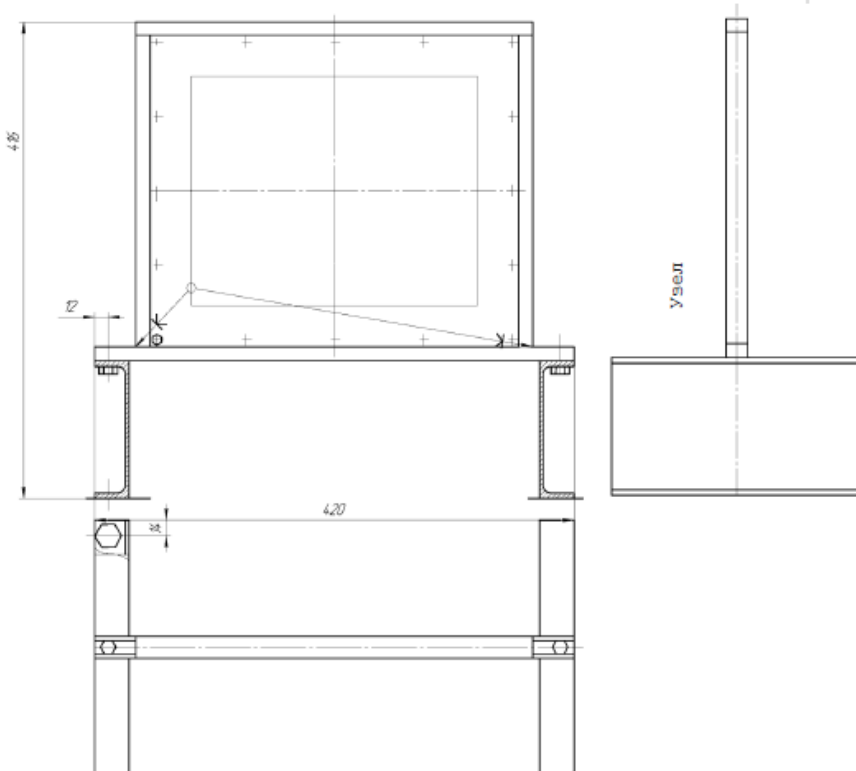


Разработана новая конструкция детекторов, обеспечивающая жесткую фиксацию эмульсионных слоев в вертикальном положении.

Форма опорной площадки детектора позволяет однозначно ориентировать детектор в направлении «вперёд-назад» по отношению к исследуемой области.

Регулируемые ножки детектора дают возможность выравнивать положение детектора по уровню.

Сборочный чертеж детектора



Детектор включает в себя следующие комплектующие (вес готовой конструкции – 10 кг):

1. алюминиевая рама, сплав АМГ6, размер: 340х290 мм (1 шт.)

2. крышка, сталь 06КП, размер: 272х322 мм (2 шт.)

3. алюминиевая платформа для рамы (1 шт.)

4. регулируемые ножки (3 шт.)

Глубина подвалов ~3 м

подвал

Экспозиция 1

Неизвестная часть I
подвальных помещений

Экспозиция 2

Неизвестная часть II
подвальных помещений

План подвалов ЦПБМ по данным Бюро технической инвентаризации

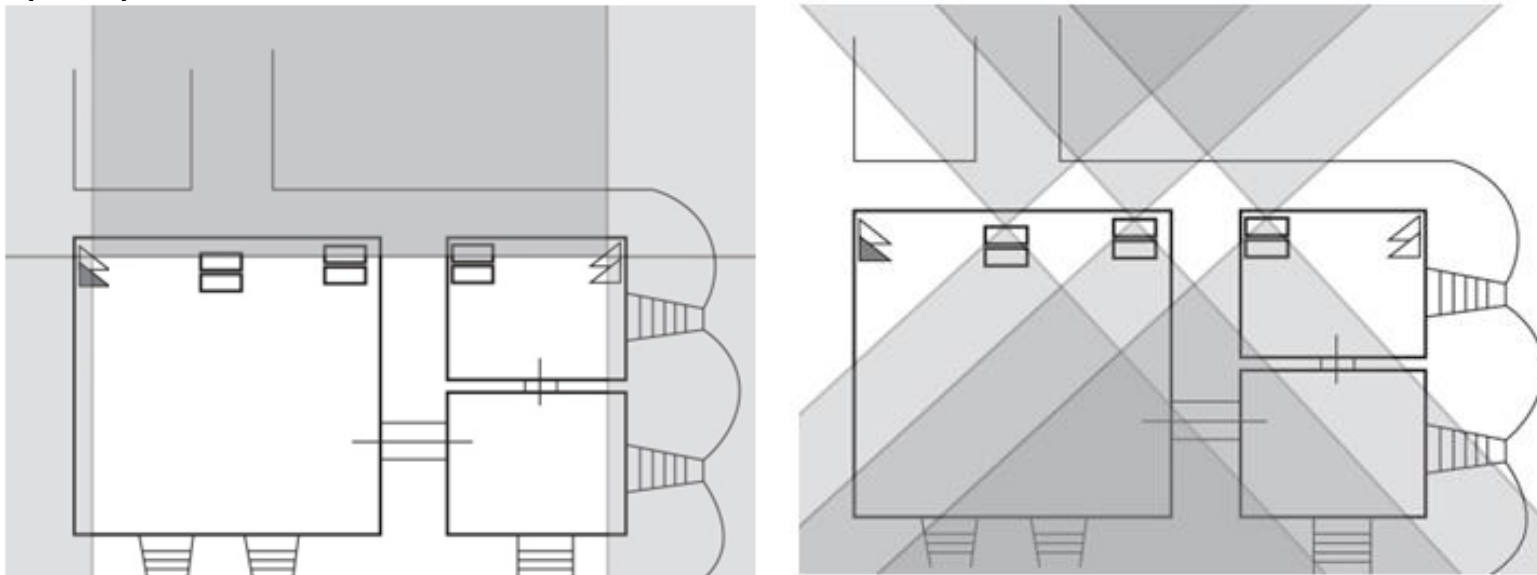
Длительность каждой экспозиции ~ 2 месяца



Расположение детекторов в подвальном помещении ЦПБМ

Один детектор даёт представление о наличии неоднородностей в определённом направлении.

Несколько детекторов показывают положение неоднородностей в пространстве.

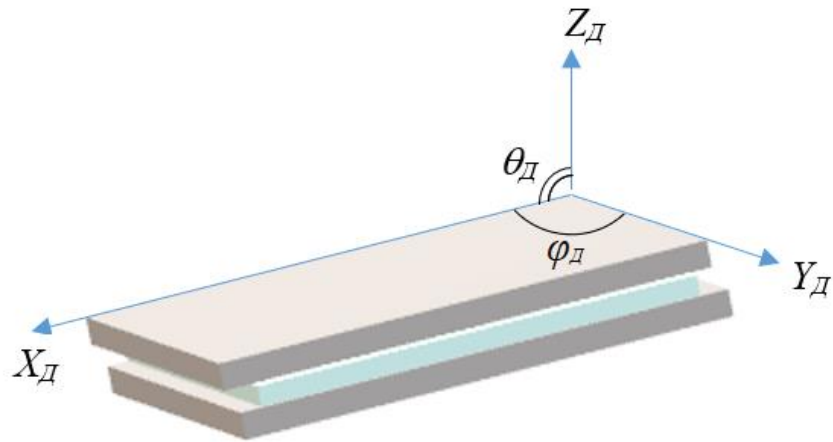


Лучами обозначены углы обзора детекторов

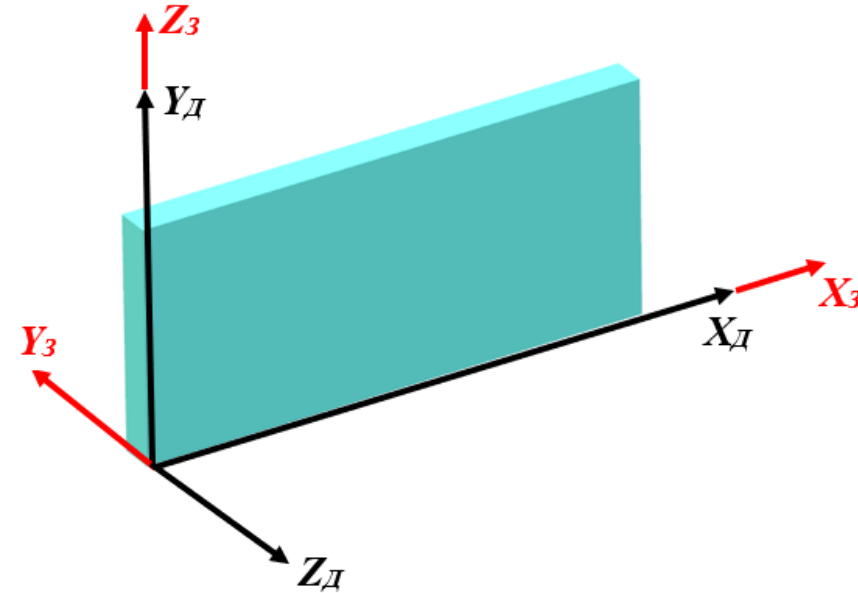


Пример расположения
детекторов в подвалах ЦПБМ

Система координат при сканировании и реконструкции треков и единая система координат для ансамбля детекторов

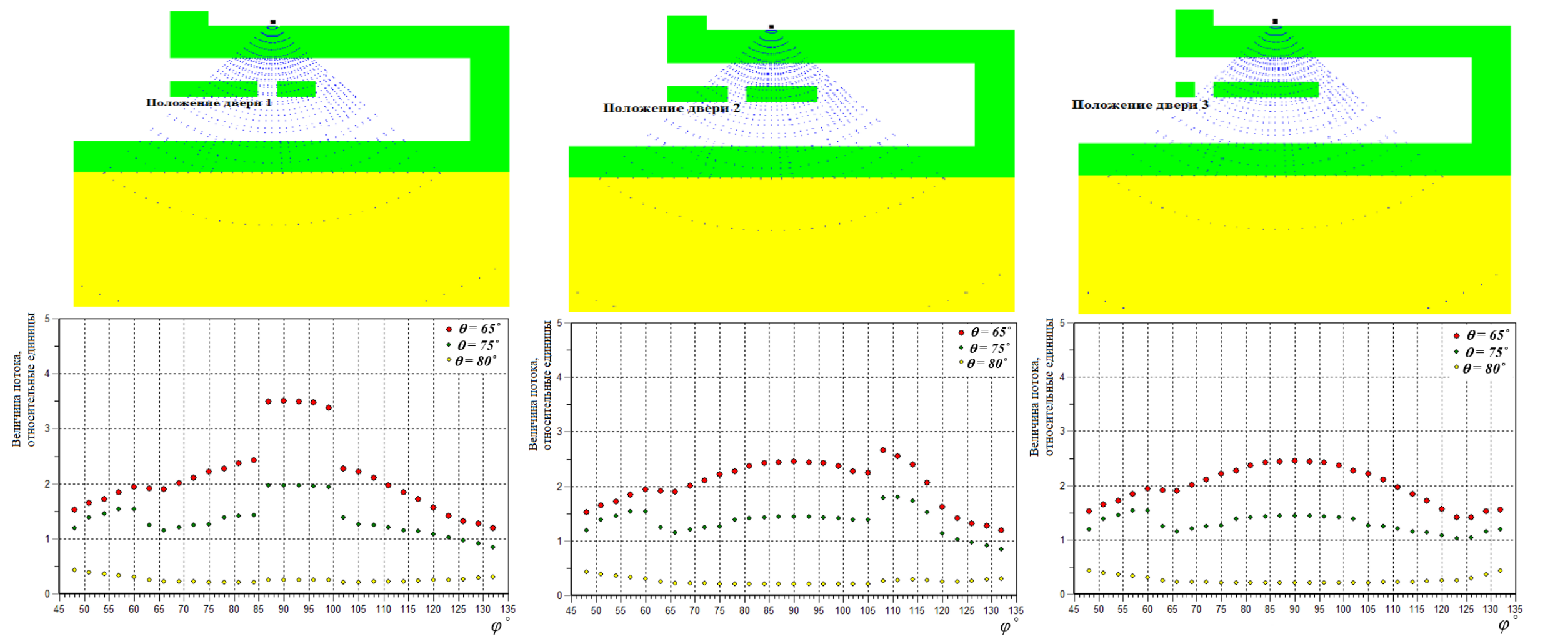


Схематическое изображение осей координат и углов
в системе координат детектора при сканировании на ПАВИКОМ



Схематическое изображение взаимного расположение систем
координат, связанных с детектором и с поверхностью земли

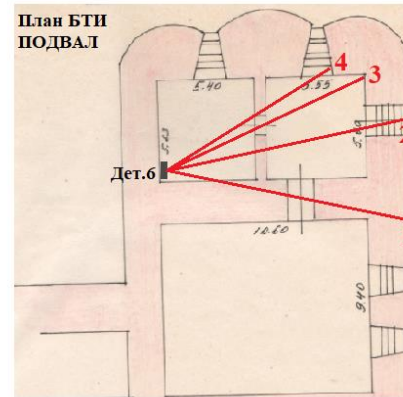
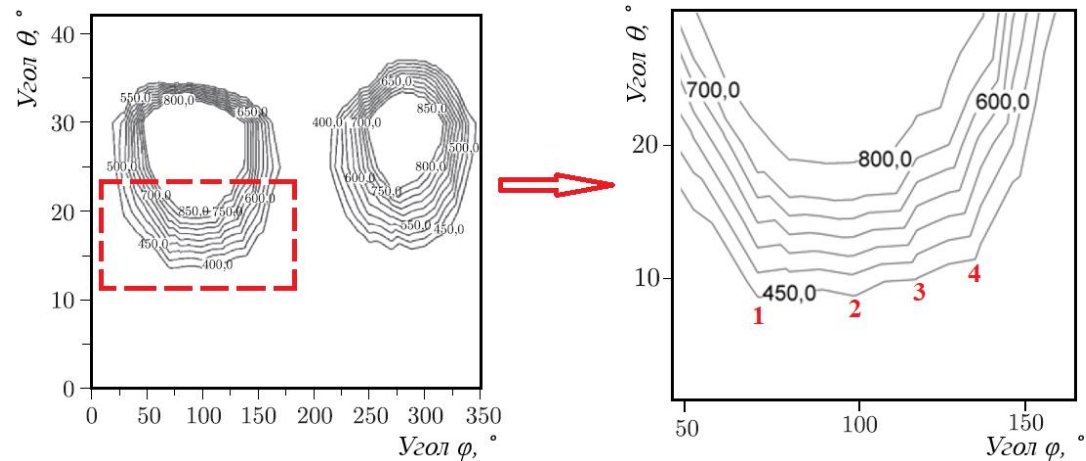
Моделирование предполагаемой дополнительной продольной стены с дверью, по-разному расположенной к детектору



Экспозиция 1, детектор D6

Подтверждение правильности работы созданных алгоритмов
путем наблюдения визуально проверяемых архитектурных элементов

Распределение числа мюонов по углам φ и θ в виде линий уровня

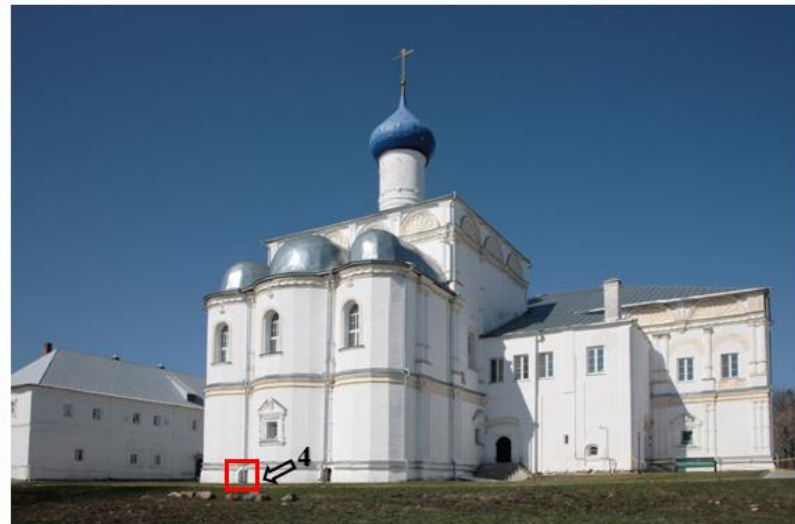
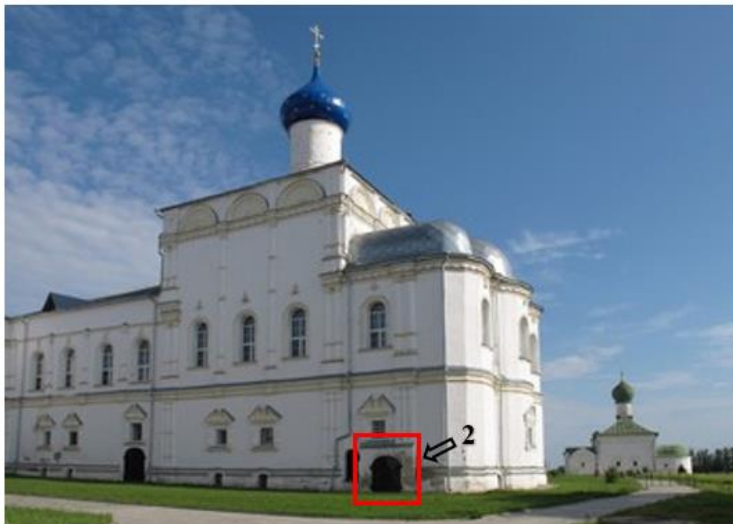


1 – переход из маленького
подвального помещения в большое

2 – вход в подвальное помещение

3 – переход между маленькими
подвальными помещениями

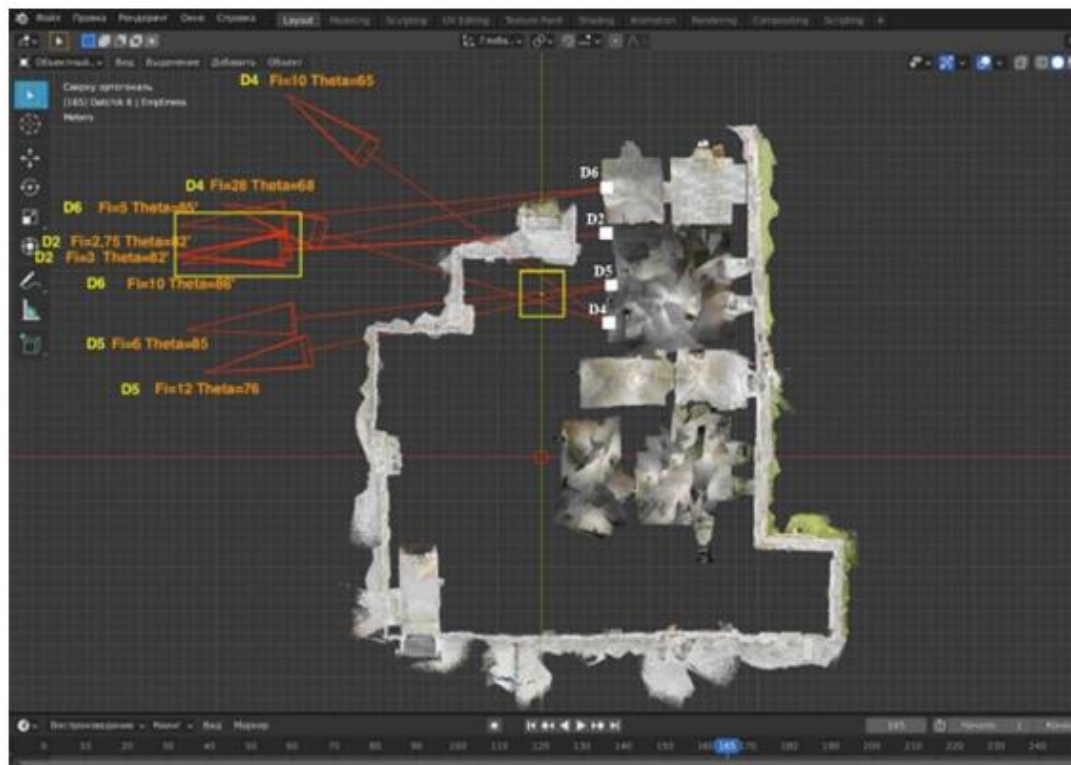
4 – окно в маленьком подвальном
помещении.



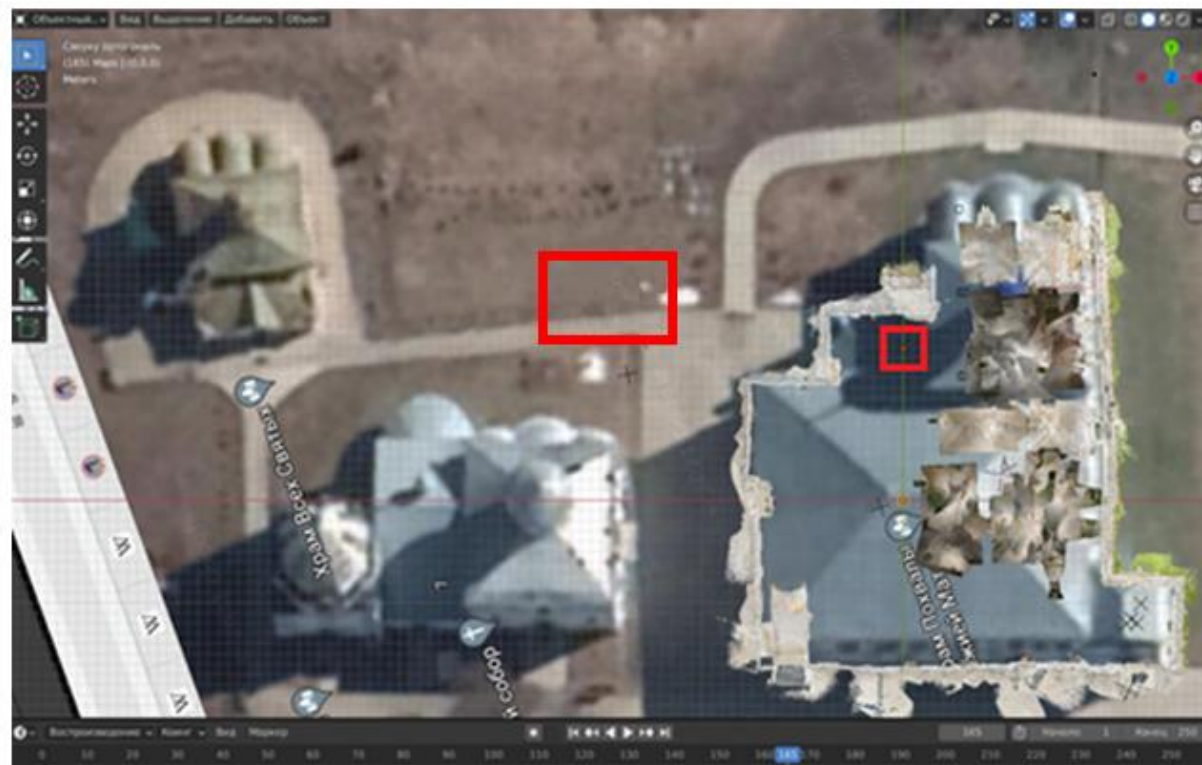
Экспозиция 1, детекторы D2, D4, D5, D6

Выявление неизвестных структурных особенностей на территории монастыря

Точность определения центра полости, обнаруженной D2, D6 составляет ± 1 метр (подвал ЦПБМ),
а для полости, обнаруженной D4, D6 $\pm 2,5$ метра (под землей между зданиями ЦПБМ, ЦВС и Троицким собором)



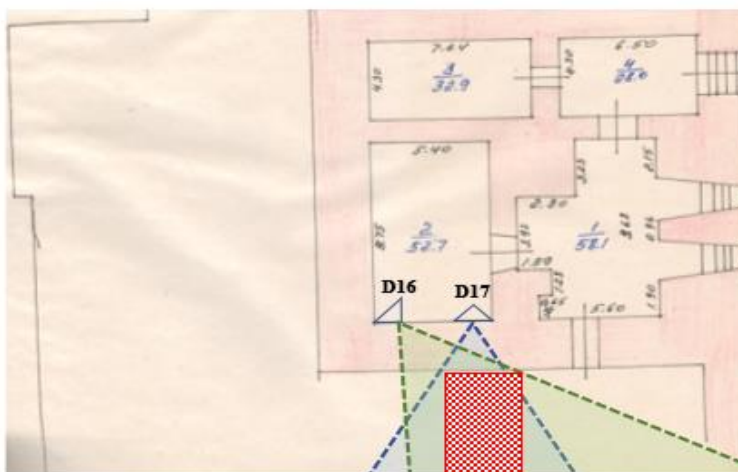
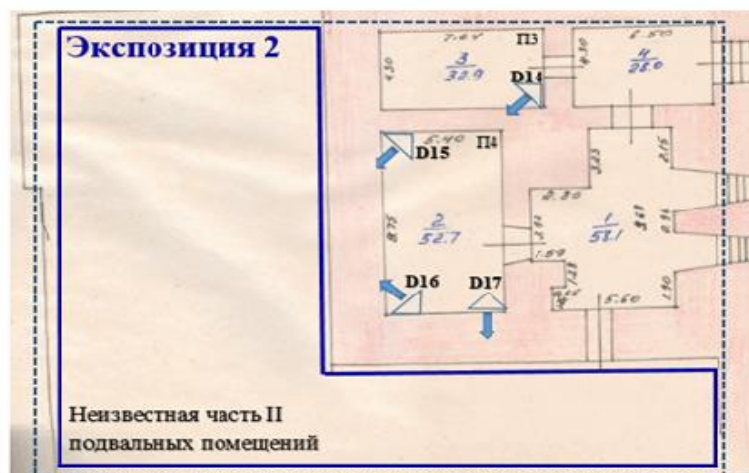
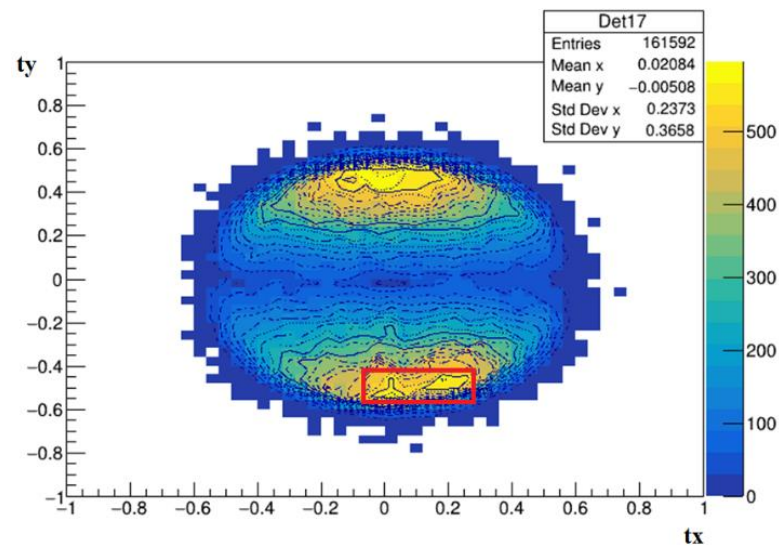
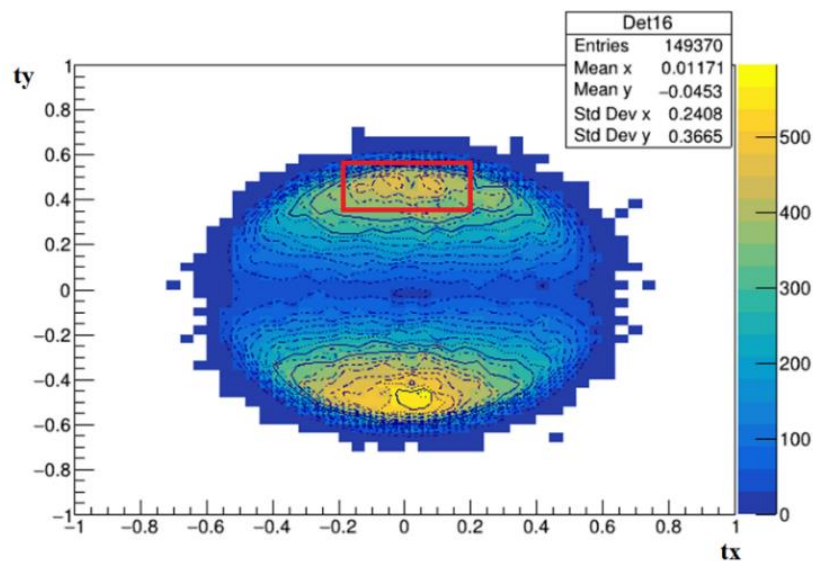
Лидарная съемка видимых границ помещения в местах экспозиции детекторов, красными лучами схематично обозначено пересечение лучей детекторов 2, 4, 5 и 6 внутри недоступной области подвалов ЦПБМ, область пересечения максимальных потоков мюонов выделена жёлтыми прямоугольниками



Та же область на объёмном изображении с привязкой к местности, области обнаруженных аномалий обозначены красными прямоугольниками

Экспозиция 2, детекторы D16, D17

Выявление неизвестных структурных особенностей подвальных помещений ЦПБМ



найденная неоднородность
с пониженной плотностью
находится точно напротив D17,
и схематично представлена в виде
заштрихованного прямоугольника

Исследование Церкви Всех Святых

Экспозиция 3

длительность ~ 2,5 месяцев

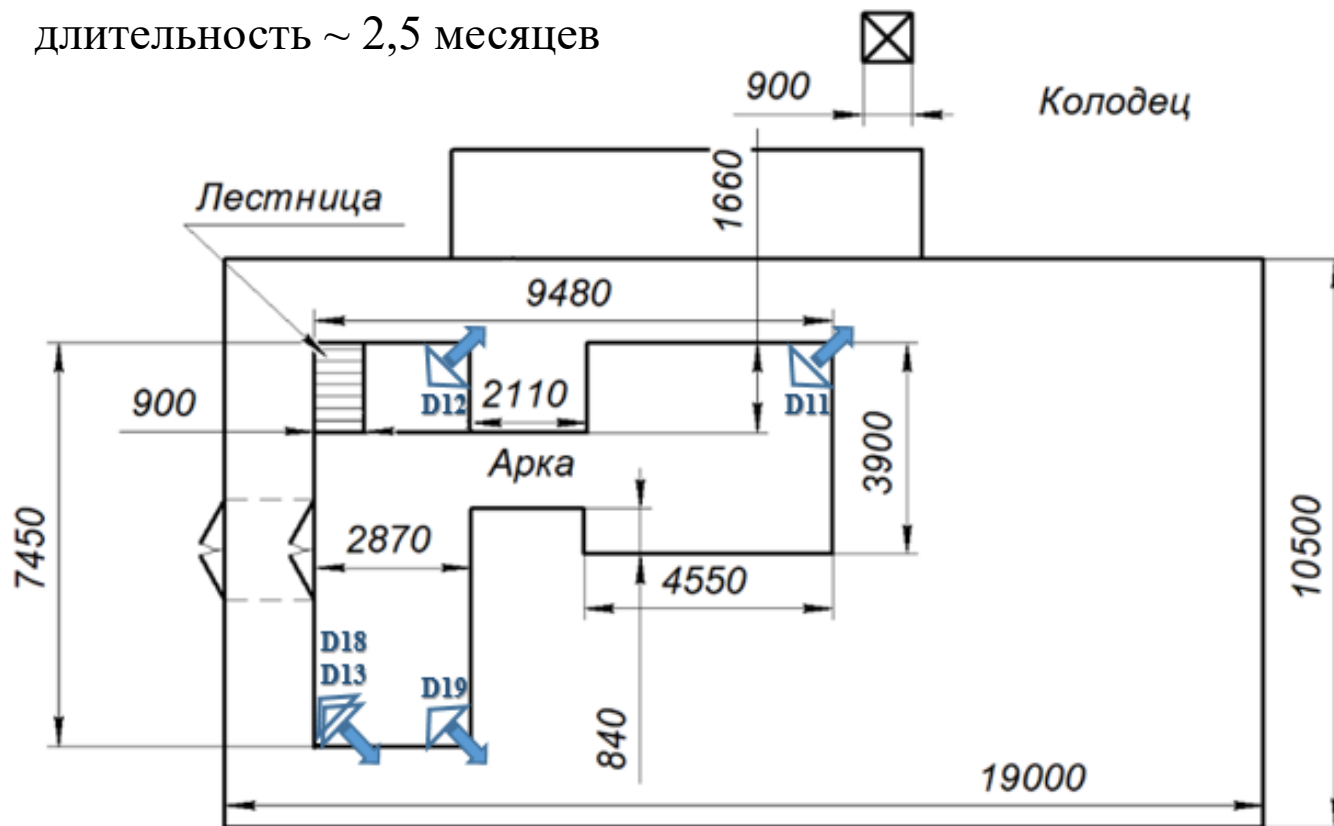
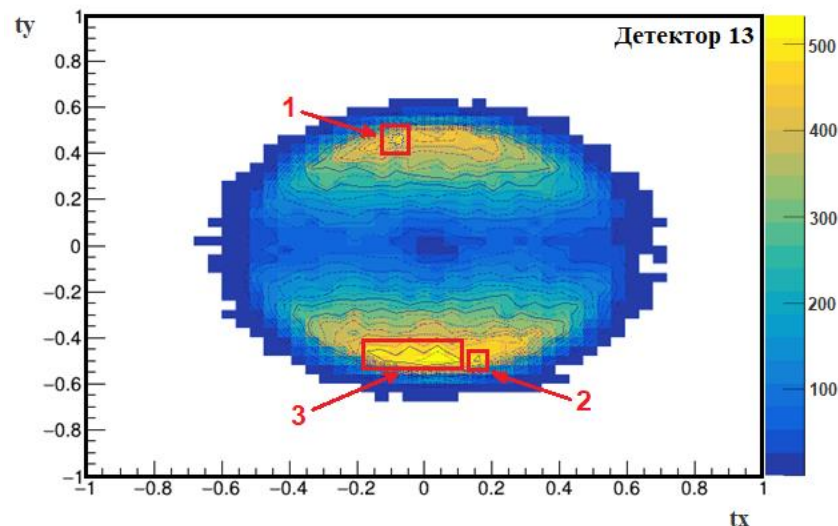


Схема расположения детекторов в подвальных помещениях



Экспозиция 3, детекторы D13, D19

Выявление неизвестных структурных особенностей возле ЦВС



$ty > 0$ направление «назад» (верхняя полусфера)

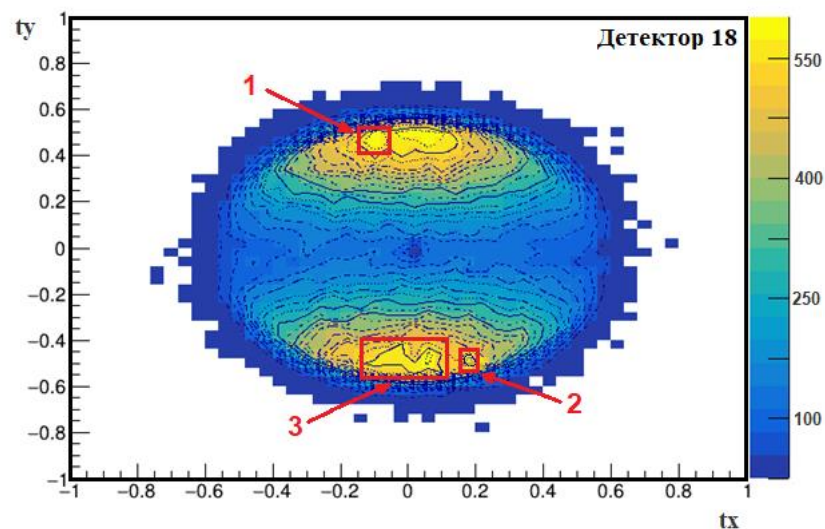
$ty < 0$ направление «вперёд» (нижняя полусфера)

1 - неоднородность в направлении «назад» $tx = -0,1; ty = 0,45$;

2 - неоднородность в направлении «вперёд» $tx = 0,18; ty = -0,5$;

3 - широкая неоднородность в направлении «вперёд»

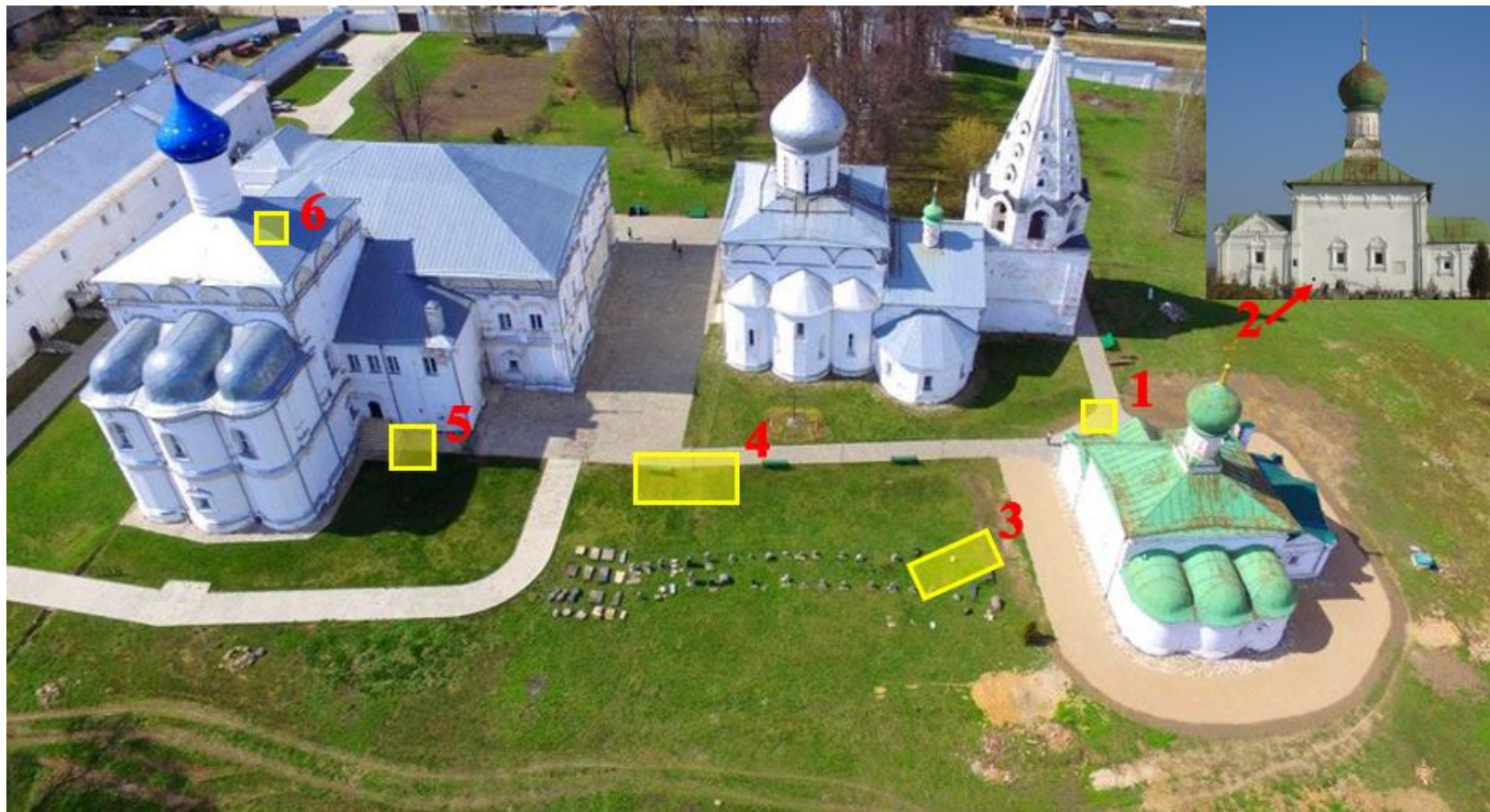
$tx = (-0,2; 0,1); ty = -0,5$



$ty = \pm 0,5$ соответствуют углу к горизонту порядка $20 \div 25^\circ$,

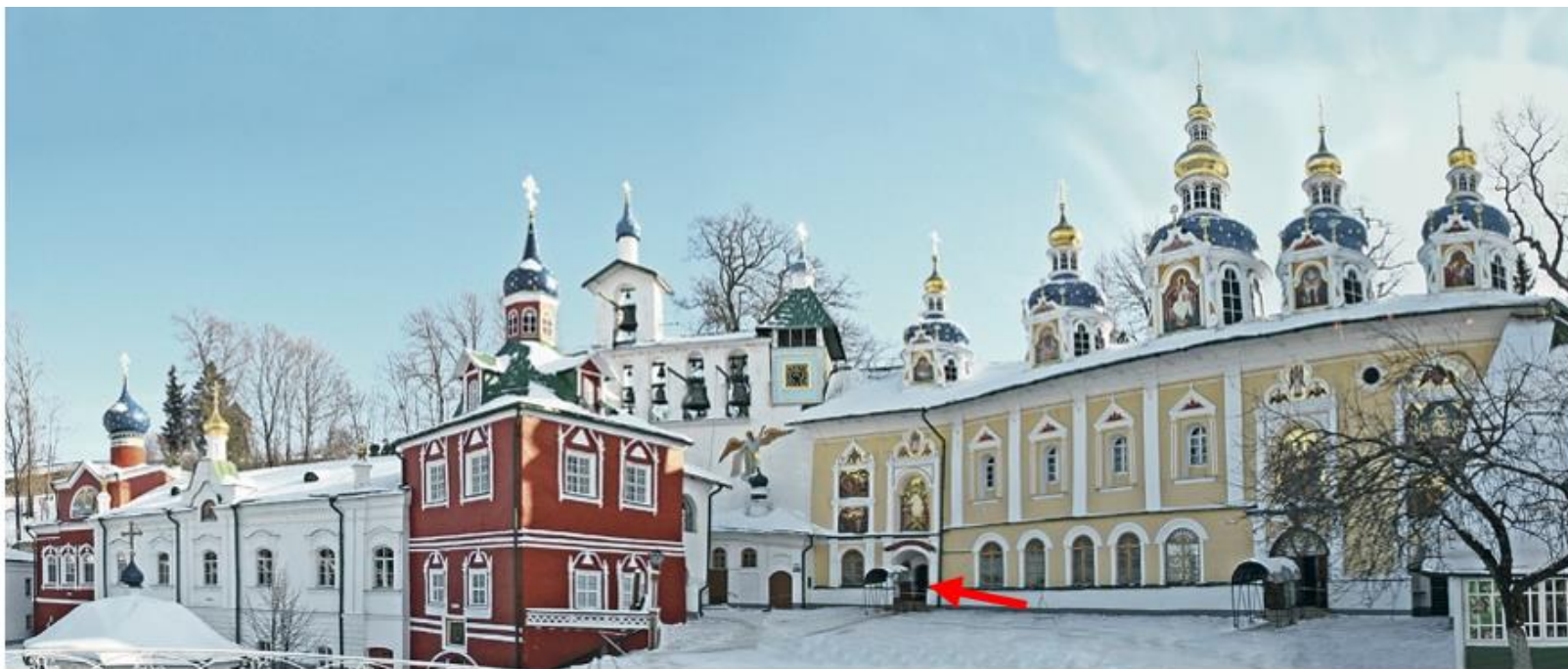
эти особенности находятся на расстоянии не более $7 \div 8$ м от детектора

Выявленные неизвестные ранее полости в зданиях и на территории монастыря



- 1** - объект небольшого размера - полость или область с плотностью, меньшей чем основная часть материала (грунт, стены)
- 2** - соответствует дверному проему, ведущему в келью между подвалом и первым этажом ЦВС – показан на вставке справа вверху
- 3** - широкая неоднородность, соответствующая полости на глубине порядка 1-1,5 м и расстоянии 7-8 м от ЦВС
- 4** - большая полость, обнаруженная с точностью $\pm 2,5$ м
- 5** – подклеть в замурованном подвале
- 6** – замурованный воздуховод в подвале

Пещерный храм Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, Печоры



Геодезические измерения:

- ортофотоплан объекта
- лидарная съемка
- съемка дроном
- положение детекторов измерено с сантиметровой точностью в единой системе координат

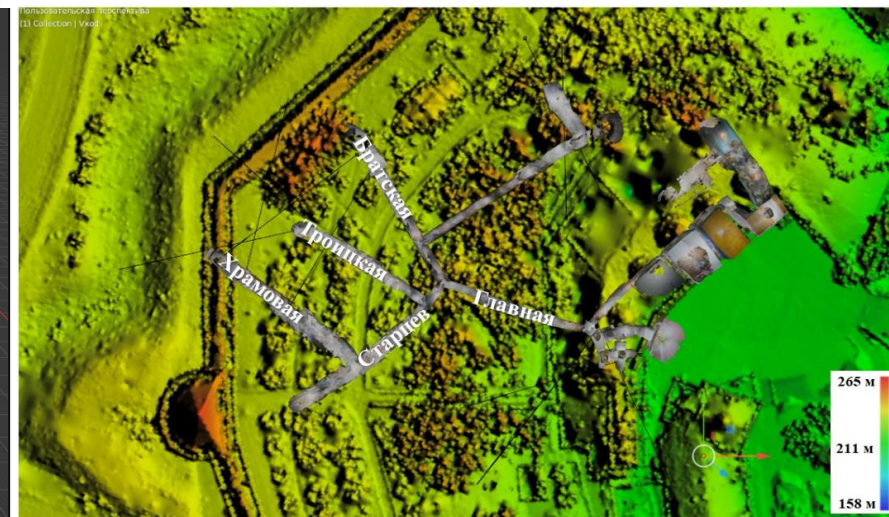
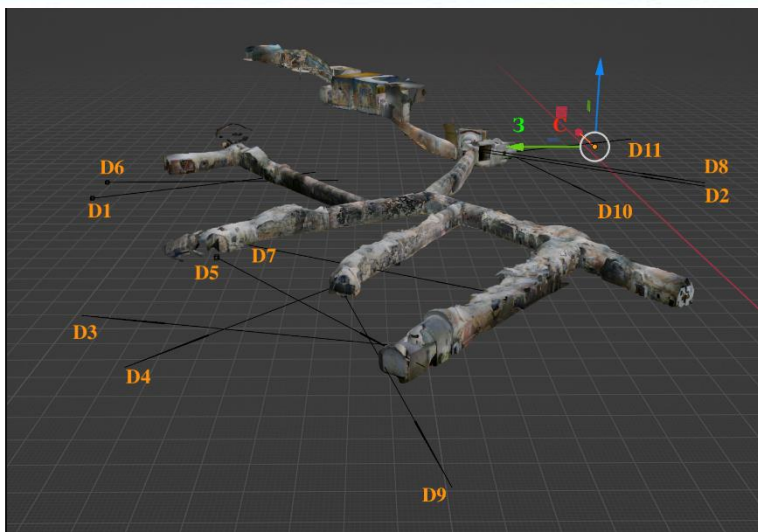


Схема расположения детекторов



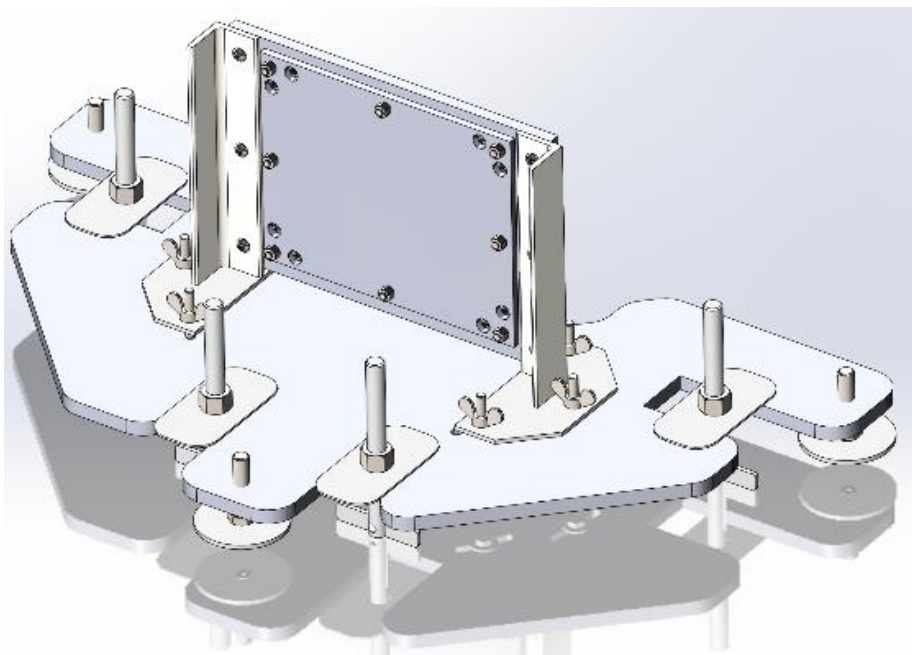
Пещерные галереи (улицы) имеют общую протяжённость более 200 м и находятся на глубине от 3 до 15 м под холмом

Области исследований:

I – область за иконой на входе

II – область за тупиком Троицкой ул.

Конструкция детектора



Стабильность позиционирования эмульсионных слоев

Эмульсионные слои жестко фиксируются в вертикальном положении, что исключает смещение во время работы.

Прецизионная регулировка

Система из опорных точек позволяет проводить выравнивание детектора по уровню, адаптируя его к любым рабочим поверхностям.

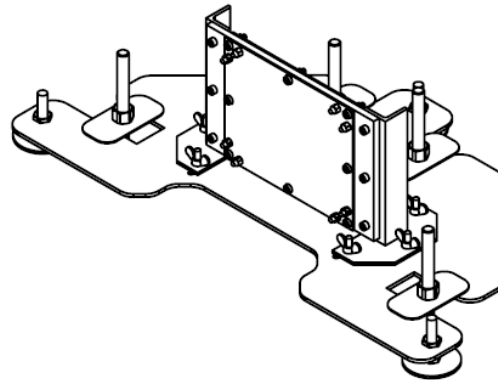
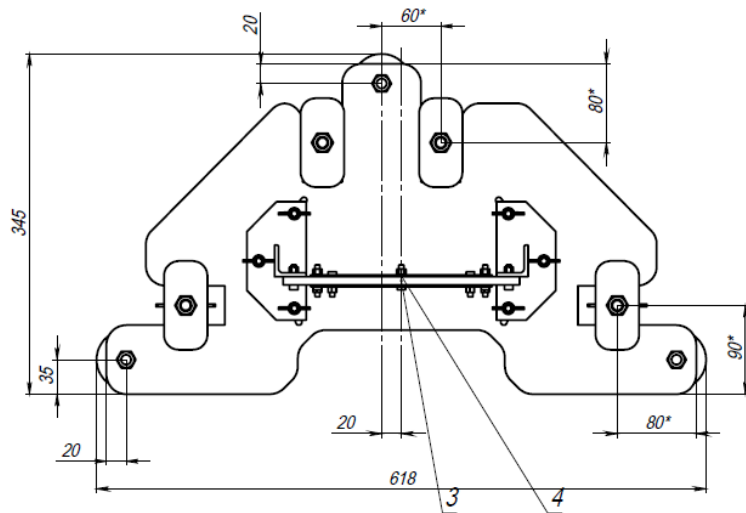
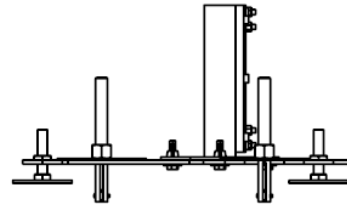
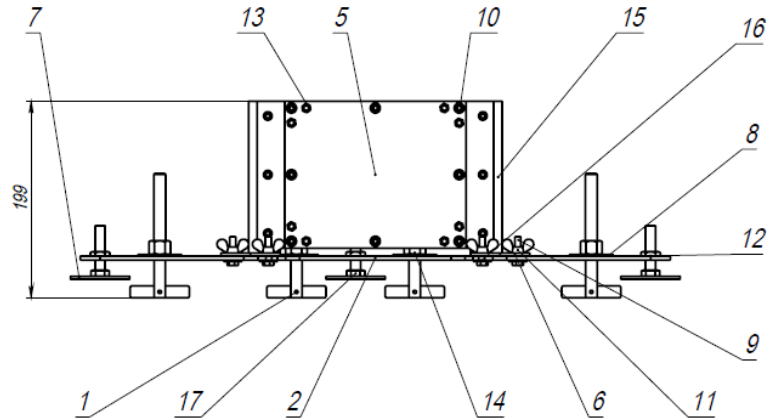
Устойчивость и однозначная ориентация детектора

Опорная площадка имеет уникальную форму, которая гарантирует устойчивость детектора, минимизируя внешние воздействия, кроме того, позволяет точно позиционировать детектор по направлению «вперёд-назад» относительно зоны исследования, исключая ошибки установки.

Преимущества:

Модульная конструкция детектора: нет необходимости полного разбора детектора, что увеличивает скорость сборки/разборки при экспозиции; повышенная точность измерений за счет стабильной геометрии слоёв; универсальность установки в сложных условиях; предусмотрена дополнительная жесткая фиксация с помощью 4-х фиксирующих шпилек, что гарантирует неподвижность детектора во время длительной экспозиции в сложных полевых условиях.

Сборочный чертеж детектора



Детектор включает в себя следующие комплектующие:

- 1- фиксирующая шпилька
- 2- основание (сталь 4 мм),
- 3- фиксирующая пластина (алюминий 8 мм),
- 4-5 пластина (сталь 2 мм),
- 6- пластина ребра (сталь 3 мм),
- 7- шайба регулировки (сталь 3 мм),
- 8- шайба (сталь 1,5 мм),
- 9- болт М6, 10- винт М5, 11- гайка М6,
- 12- гайка М10, 13- гайка М5, 14- гайка М12,
- 15- уголок 4х32 (154 мм),
- 16- шайба А.6,
- 17- болт с шестигранной головкой и винт с потайной головкой и шестигранным углублением под ключ

Экспозиция и сборка детекторов

Каждый детектор содержит 6 эмульсионных слоев

Размер эмульсионного слоя: 10 см × 12.5 см

Время экспозиции 11 детекторов в пещерах ~ 3.5 месяца

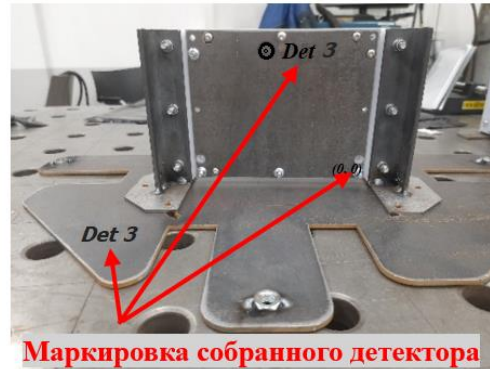
Фоновых детекторов на чердаке – 2 месяца



Маркировка эмульсионного пакета
Стопка из 6 эмульсий
собирается с точностью 1 мм



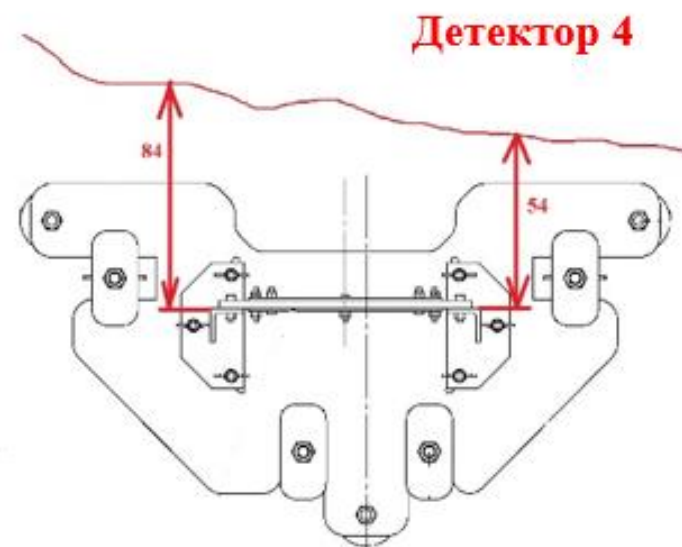
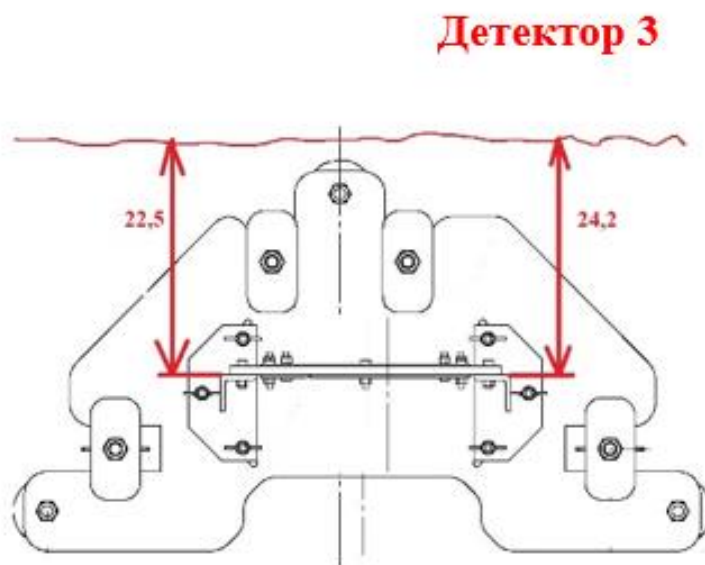
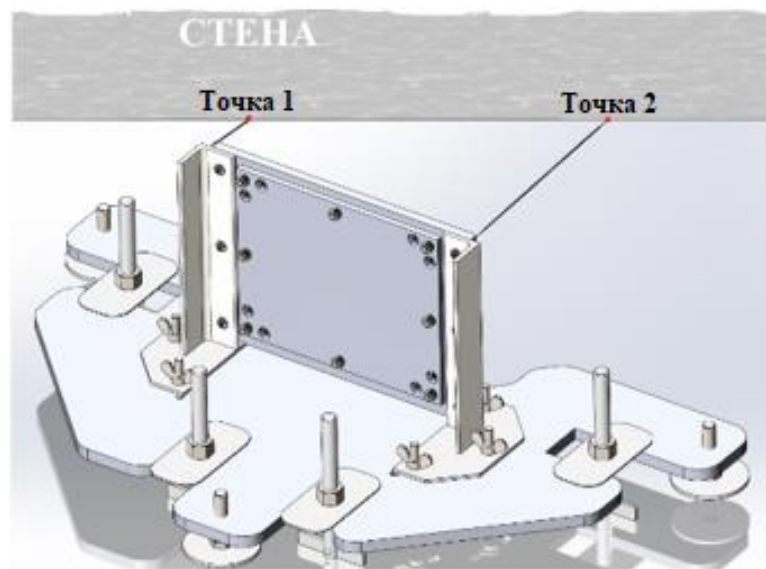
Слой пористой резины
Механическая конструкция
для защиты от деформаций



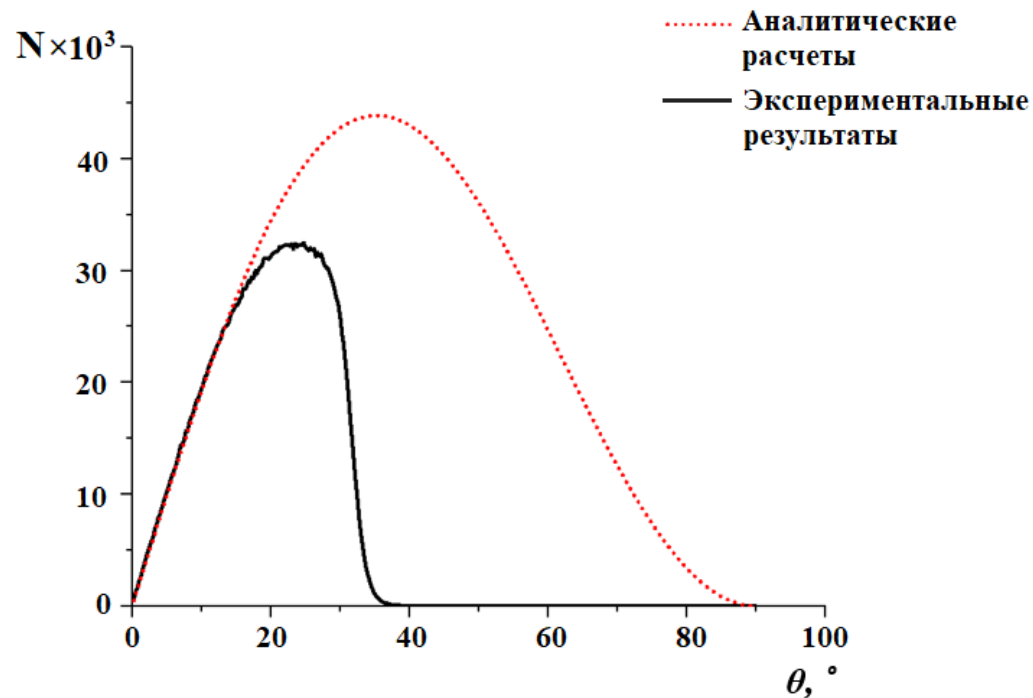
Маркировка собранного детектора
Полностью собранный
детектор



Измерения контрольных точек при длительной экспозиции



Поправка на эффективность регистрации мюонов



Сравнение результатов расчётов мюонного фона по формуле (красная пунктирная линия) с полученными экспериментальными данными горизонтального фонового детектора (черная линия)

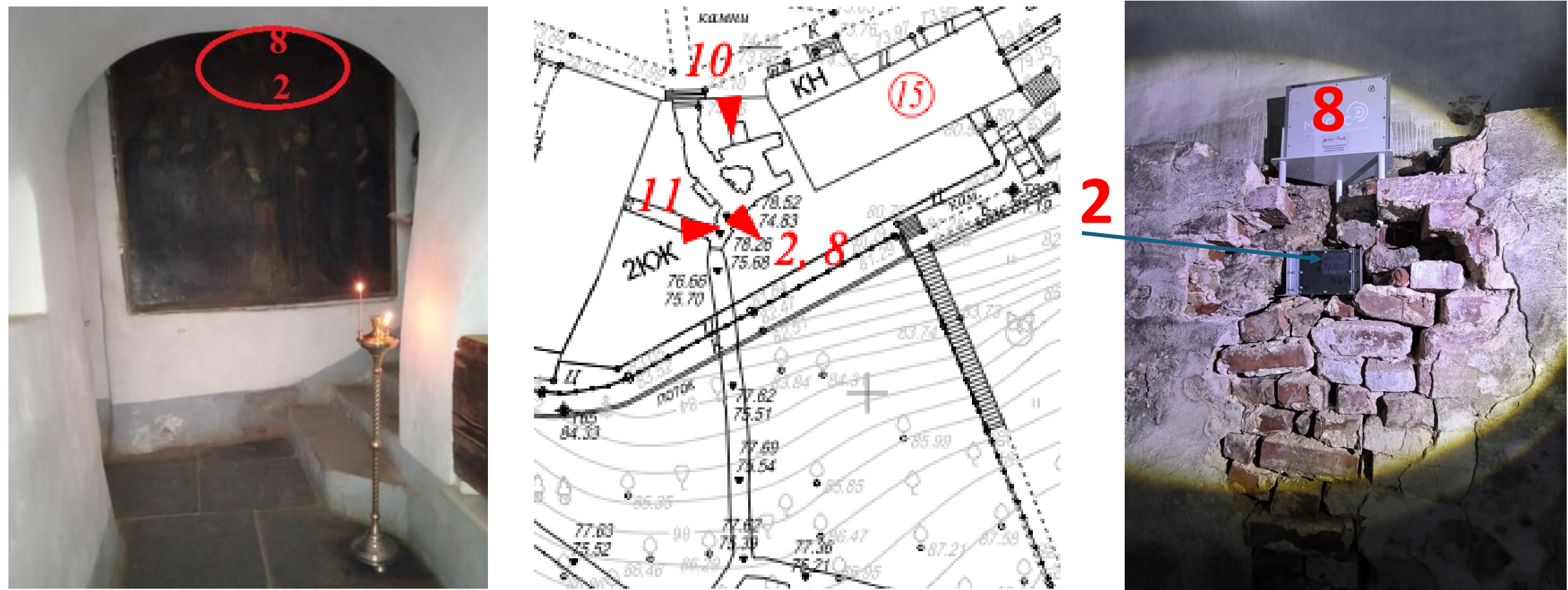
$$\varphi_{\text{Д}} = \text{const} \cdot \cos^2 \theta_{\text{Д}} \cdot \sin \theta_{\text{Д}}$$

При $\theta > 15^\circ$ вводилась поправка при обработке данных вертикальных детекторов

$$N_{\varphi, \theta}^{\text{Norm}} = \frac{N_{\varphi, \theta}}{N_{\varphi, \theta}^{\text{Background}}}$$

Поправочный коэффициент определялся как отношение величины потока, рассчитанной по аналитической формуле к экспериментальной величине потока по данным горизонтального детектора для того же зенитного угла.

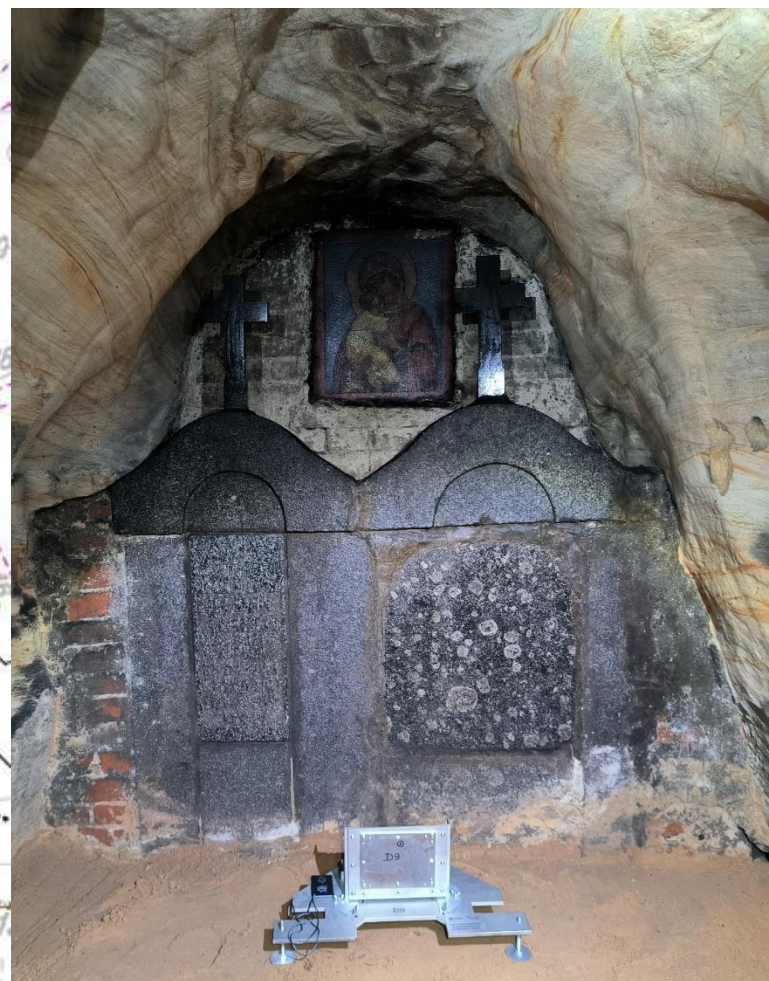
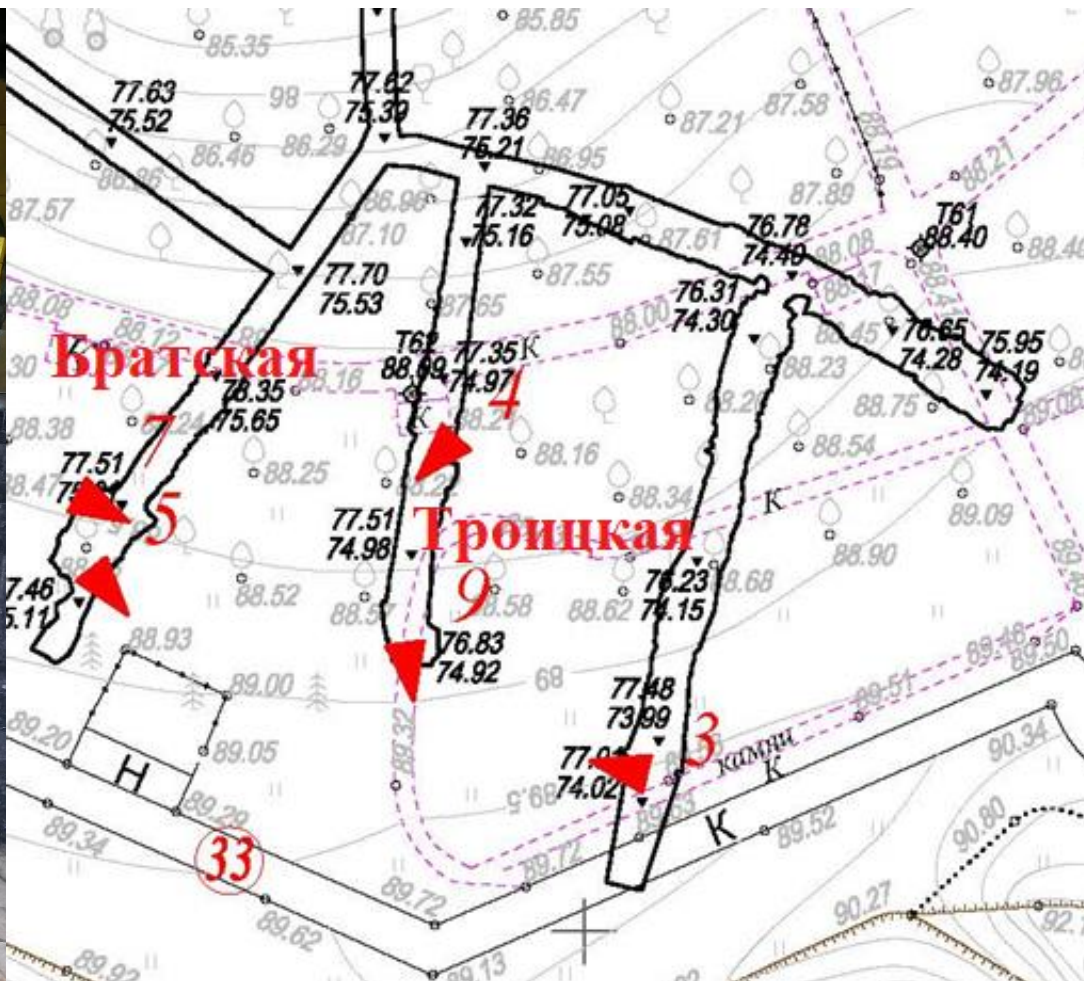
Пример установки пары детекторов на первом объекте - пространство за иконой на входе в храм



Пример установки детекторов на втором объекте – пространство вокруг Троицкой улицы



Детектор 5 на Братской улице



Детектор 9 на Троицкой улице

Алгоритм поиска и идентификации скрытых неоднородностей

шаг 1: сканирование и реконструкция треков в каждом отдельном детекторе

шаг 2: обработка данных горизонтального фонового детектора и определение поправки на эффективность детектора

шаг 3: построение угловых распределений в системе координат земли

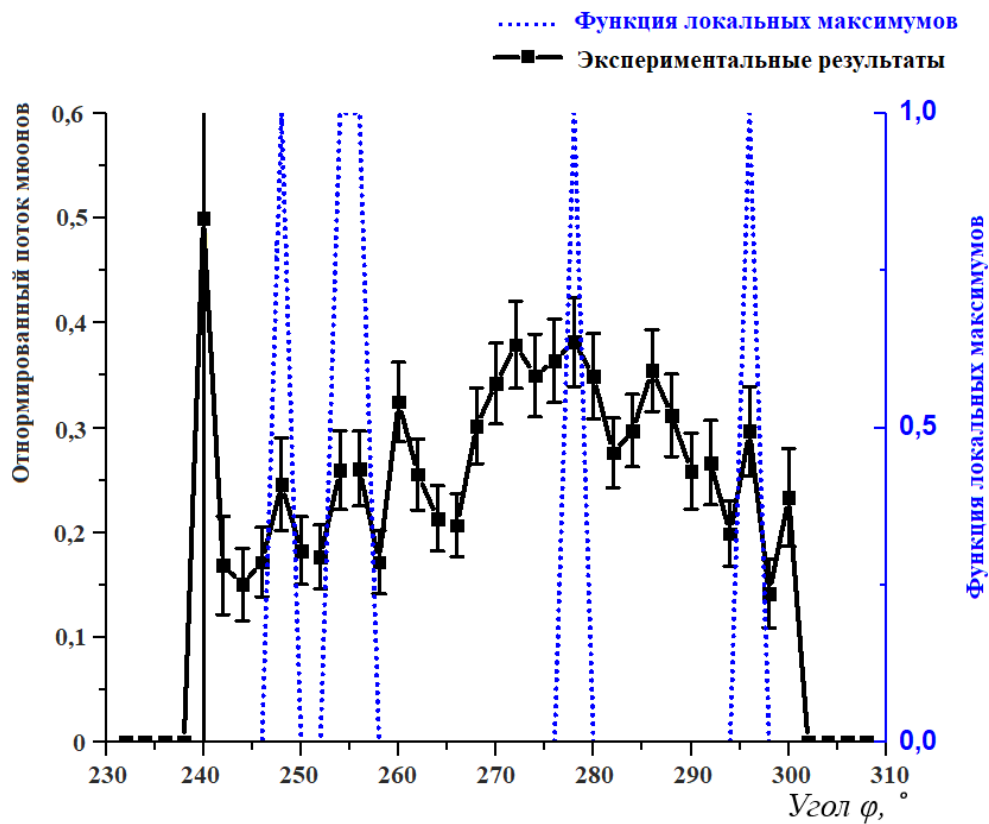
шаг 4: нормирование полученных распределений на данные вертикального фонового детектора

шаг 5: определение положений локальных максимумов

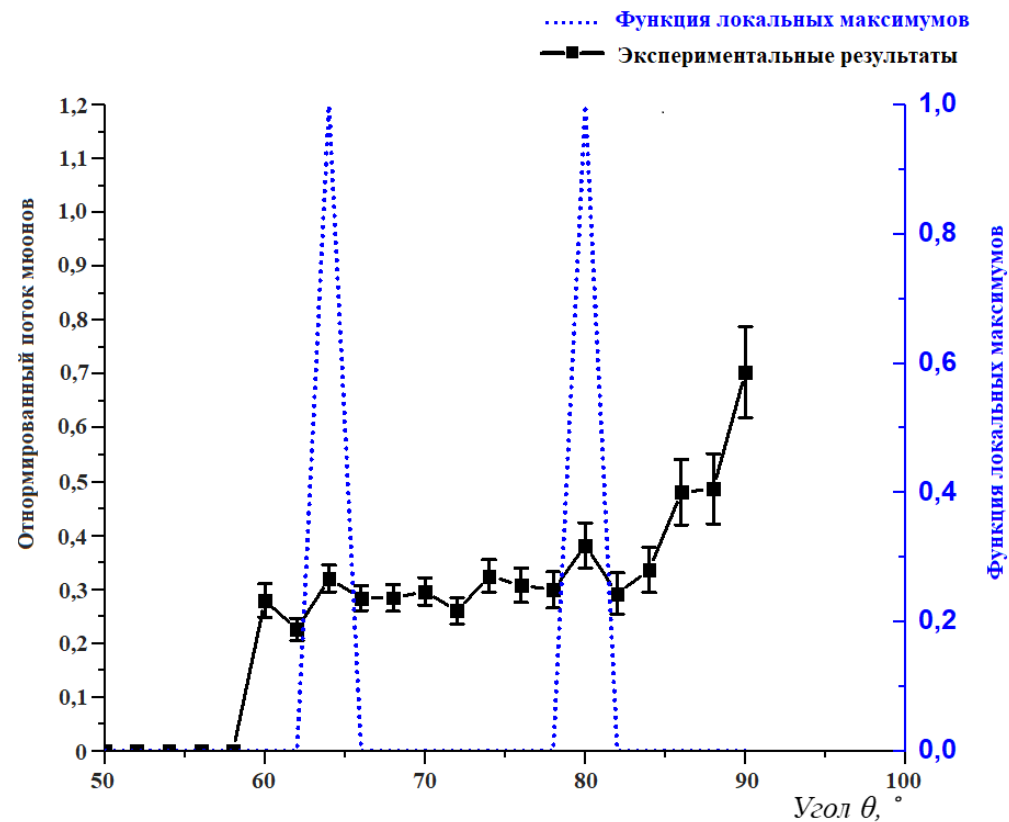
шаг 6: поиск пересечений локальных максимумов

Иллюстрация алгоритма поиска локальных максимумов распределений

Перебираются все возможные направления φ и θ , и если интервал направлений пересекает данный объем элемента, то он наносится на карту



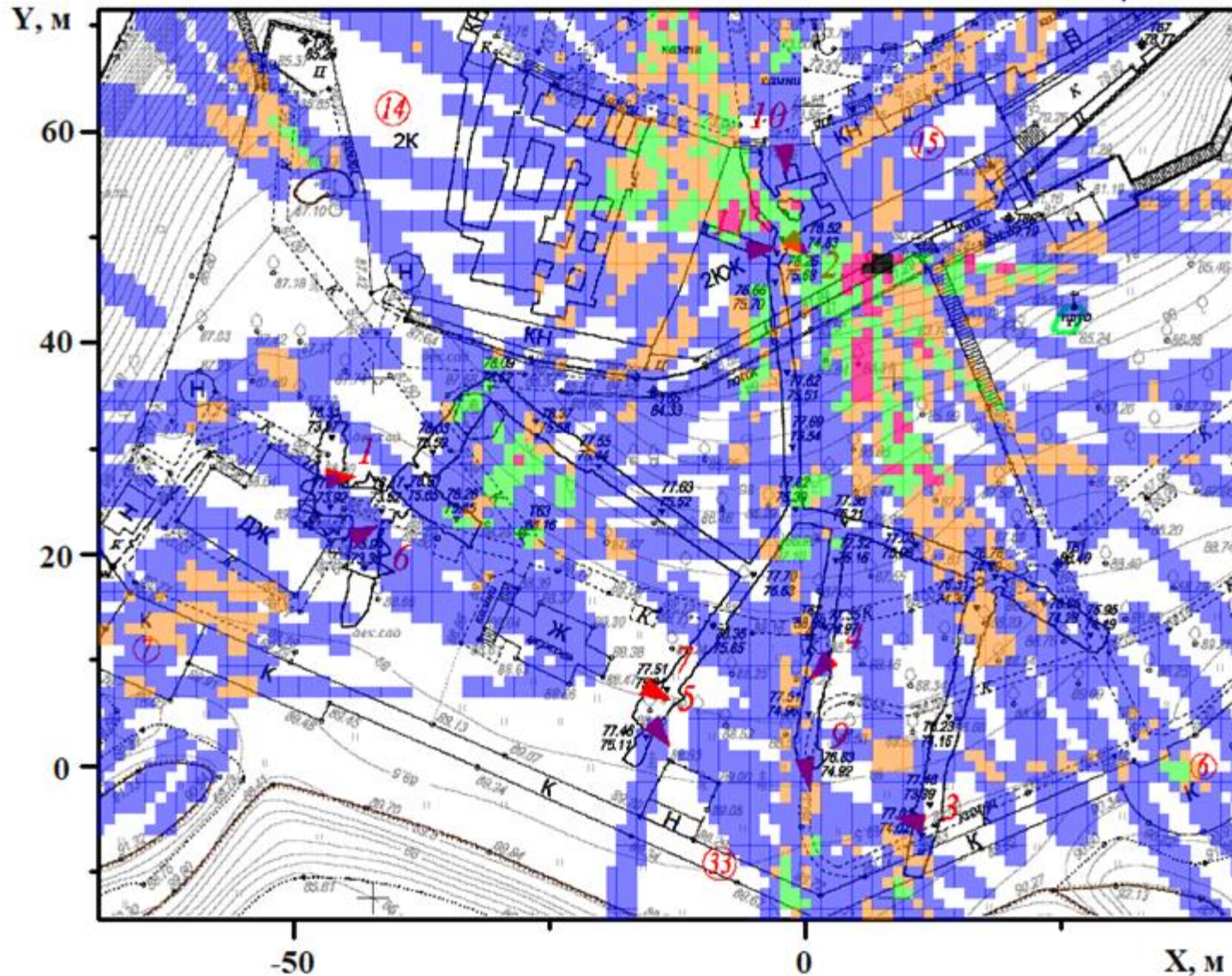
Чёрным показаны распределения мюонов по φ при $\theta = 80^\circ$, синим пунктиром – функция положения локальных максимумов



Чёрным показаны распределения мюонов по θ при $\varphi = 278^\circ$, синим пунктиром – функция положения локальных максимумов

Определение положений локальных максимумов

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

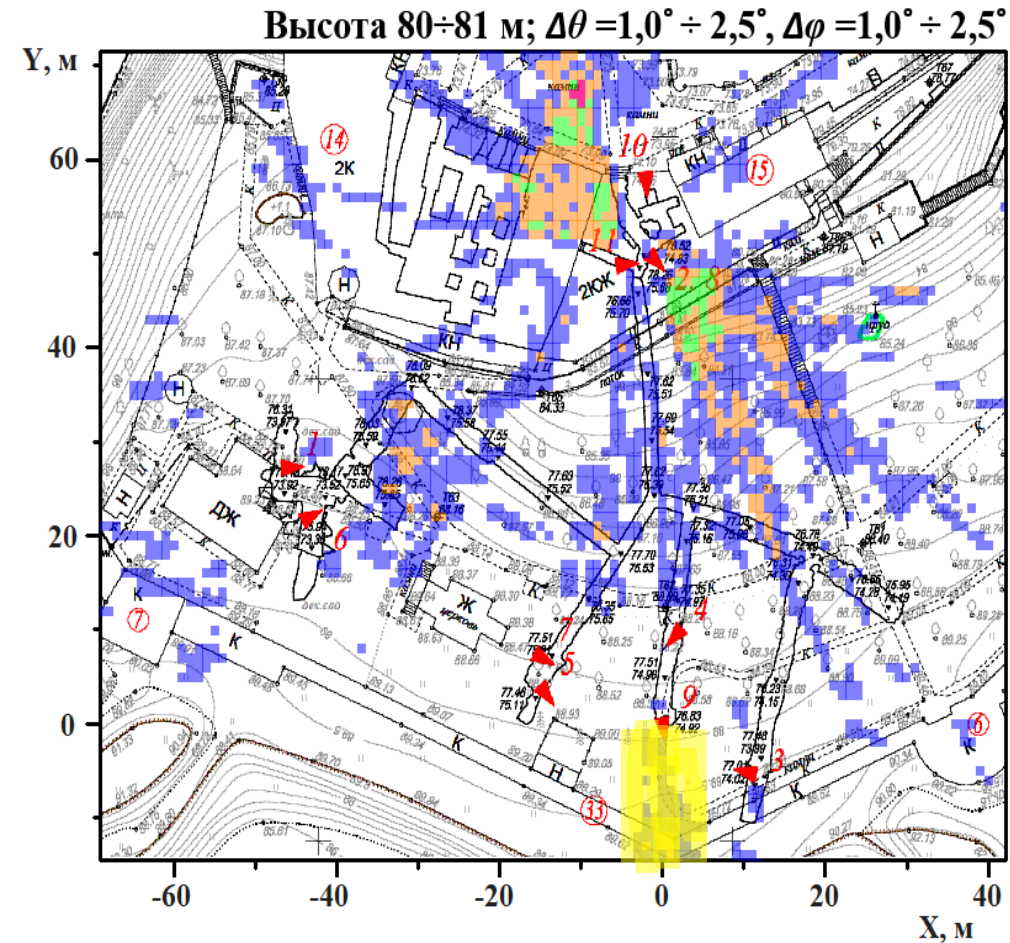
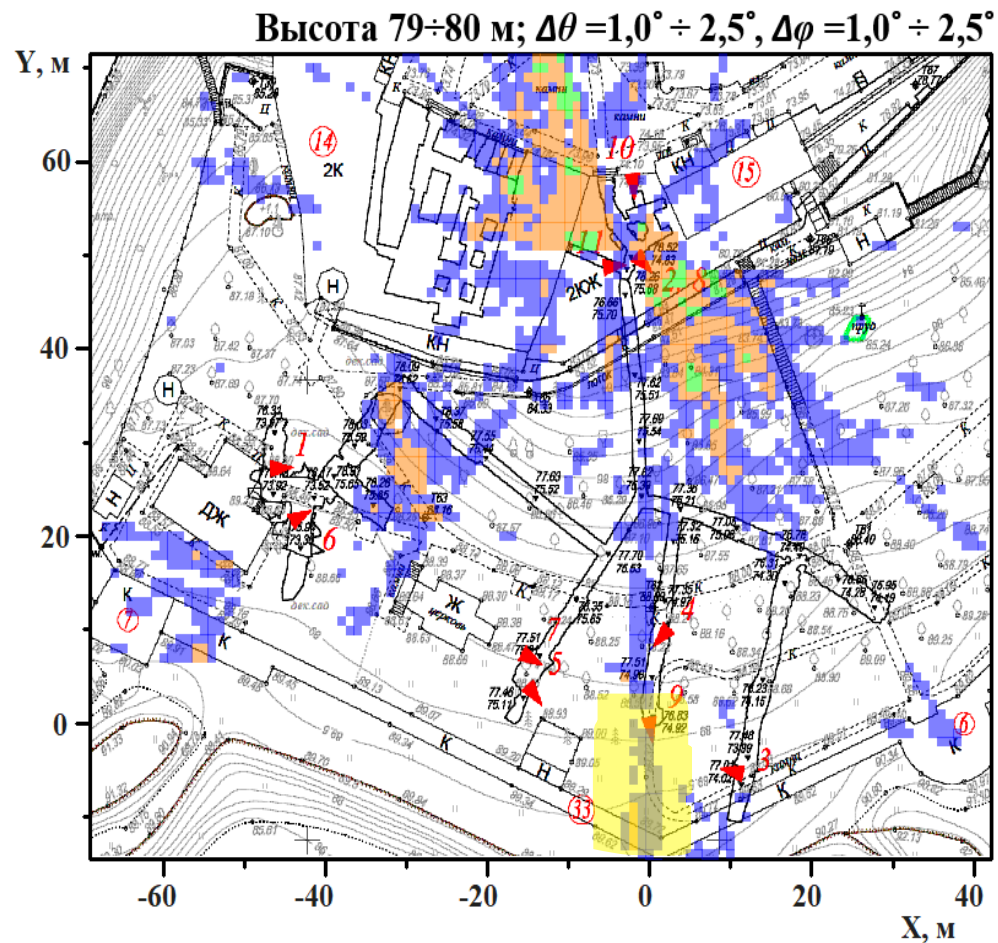


- 1 Детектор
- 2 Детектора
- 3 Детектора
- 4 Детектора
- 5 Детекторов

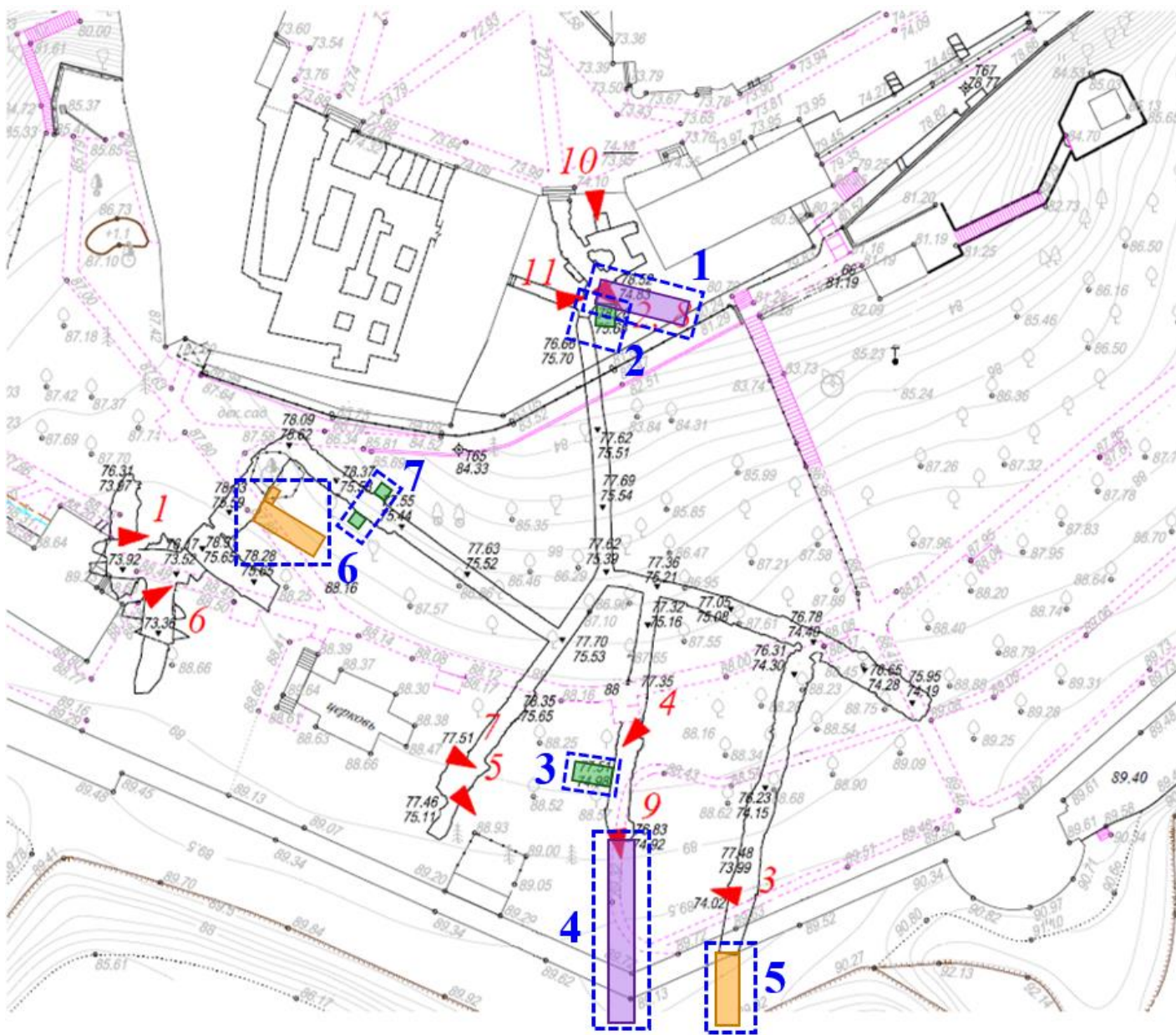
Разными цветами
обозначены направления
локальных максимумов,
зарегистрированных
разным числом детекторов

Выявленные неизвестные ранее полости в исследуемой области II D5, D9, D3

Продолжение Троицкой улицы вдоль её основного направления (выделено желтым маркером)
на высоте 79-81 м напротив D9



Выявленные неизвестные ранее полости на территории пещерного храма



полость 1 (на высоте 77-79 м.) – склеп

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

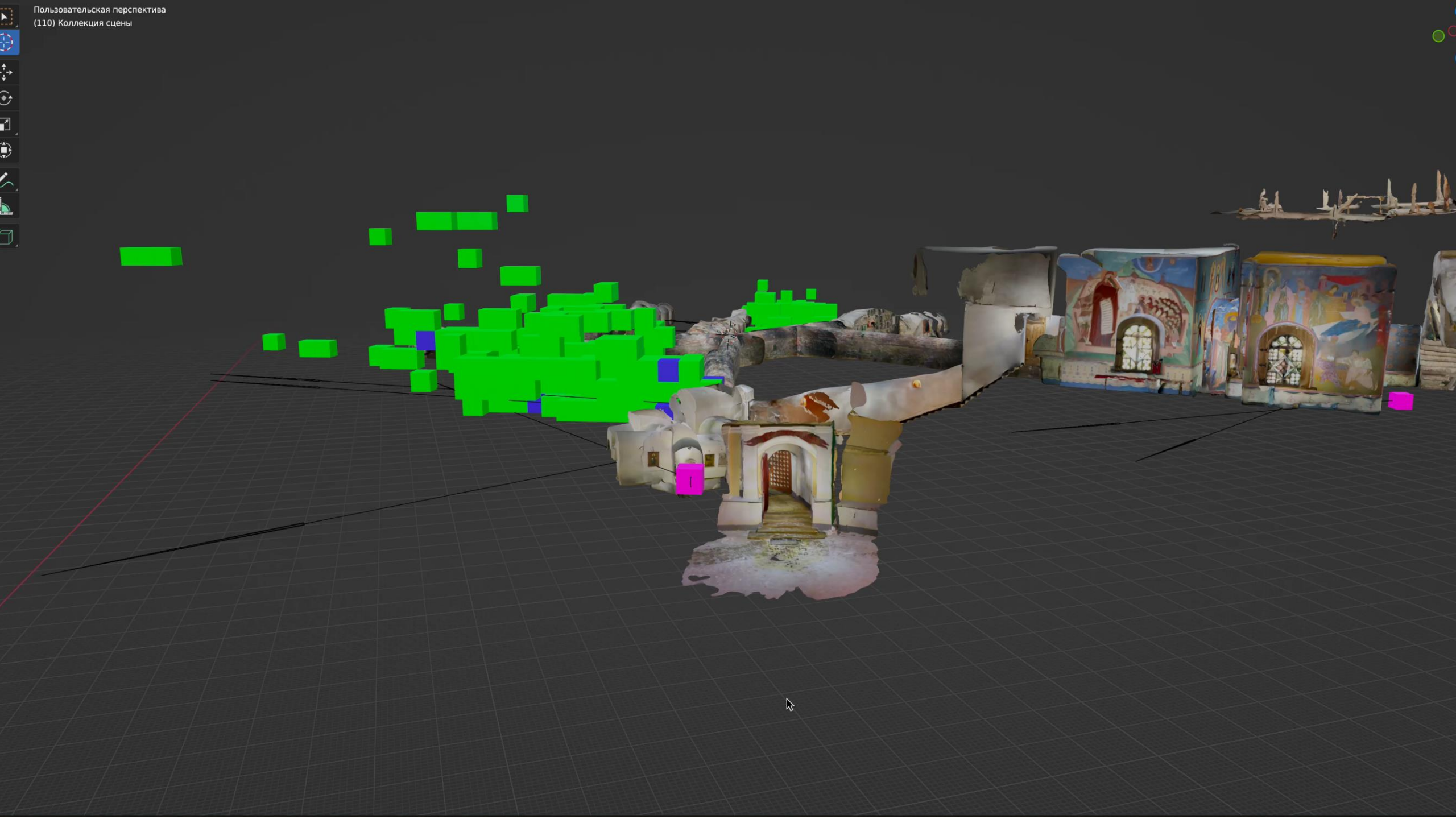
полость 3 (на высоте 79-80 метров) между D4 и
D9- пустота между Братской и Троицкой улицами

полость 4 (на высоте 79-81 м.) напротив D9
(продолжение Троицкой улицы вдоль её
основного направления)

полость 5 (на высоте 77-78 м.) - в продолжении
Храмовой улицы

полость 6 (на высоте 79-81 м.)

полость 7 (на высоте 77-78 м.) - напротив D6



Университетская мюнография в мире



Техасский технологический университет



США



Университет Ланьчжоу



Китай



Токийский университет



Япония



Пекинский Университет



Китай



Нагойский университет



Япония



ФИАН



Россия



Университет Неаполя



Италия



Университет «МИСИС»



Россия



Промышленный университет Сантандера



Колумбия



НИИЯФ МГУ



Россия



Университет Берна



Швейцария



Университет «МИФИ»



Россия



Университет Чуанан



Южная Корея



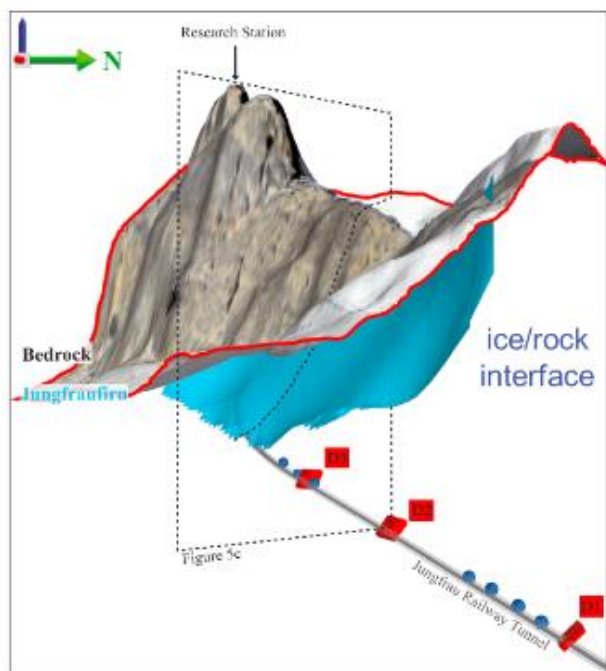
Лиссабонский университет



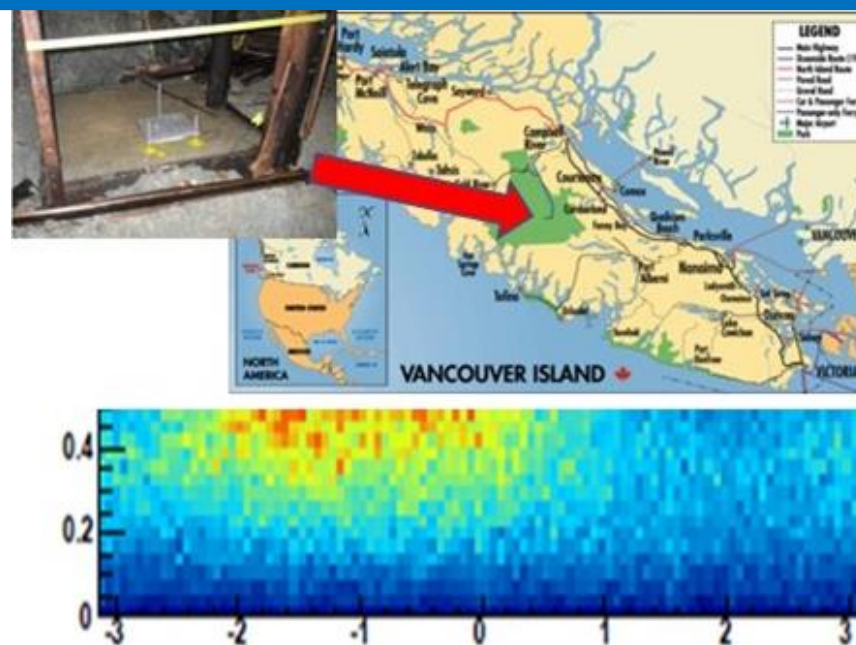
Португалия

Экспозиция в 2016 г эмульсионных детекторов, выявила существование пустой камеры длиной 30 метров и поперечным сечением 8 м. Эта камера является первой крупной внутренней структурой, найденной в пирамиде с 19 века.

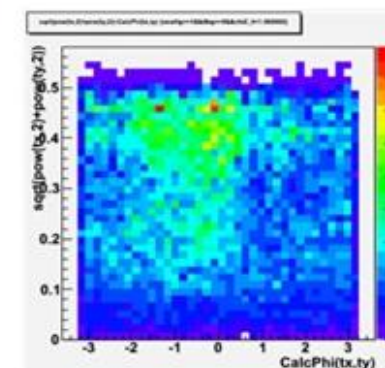
Мюнография геологического разлома на горе Тейде на острове Ла Пальма на Канарах. Эти модули устанавливаются на Ла Пальме и на горе Тейде.



Трехмерно реконструированная граница раздела лед-скальная порода (синяя поверхность), определенная с помощью анализа мюнографии. Geophysical Research Letters 55933 (2017).



Поиск месторождения золота в Канаде



Коммерческая мюнография в мире



Central Alliance



Англия



Lingacom



Израиль



CRM Geotomography
Technologies Inc



Канада



Lynkeos
Technologies



Шотландия



GScan



Эстония



Muon vision



Испания



Geoptic



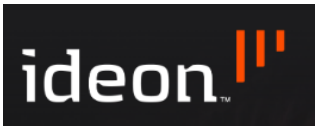
Англия



Muon
Solutions



Финляндия



Ideon



Канада



Muon
Systems



Испания



MUODIM



Франция

Ltd. of Gansu
Province, Gannan

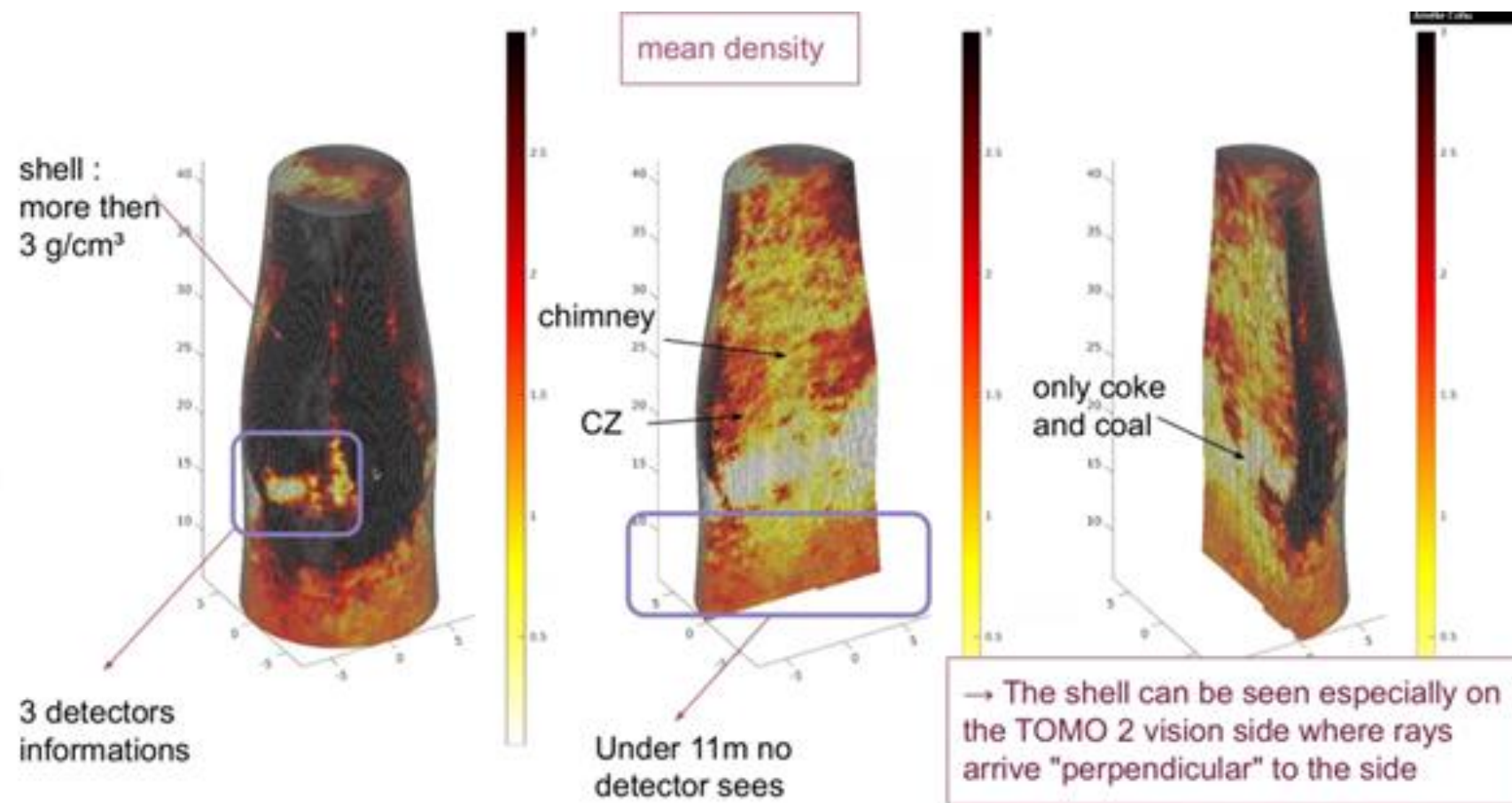


Китай

Компания MUODIM, Франция (Институт ядерной физики в Лионе)



Первая 3D реконструкция доменной печи методом мюнографии.
3D изображение внутреннего объема доменной печи и его содержания.



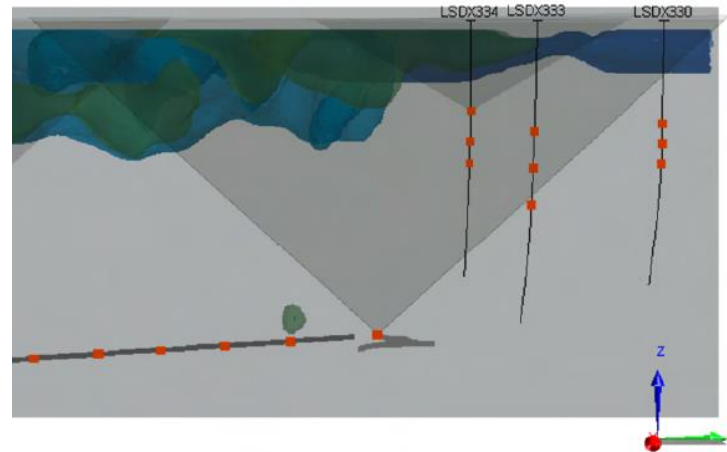
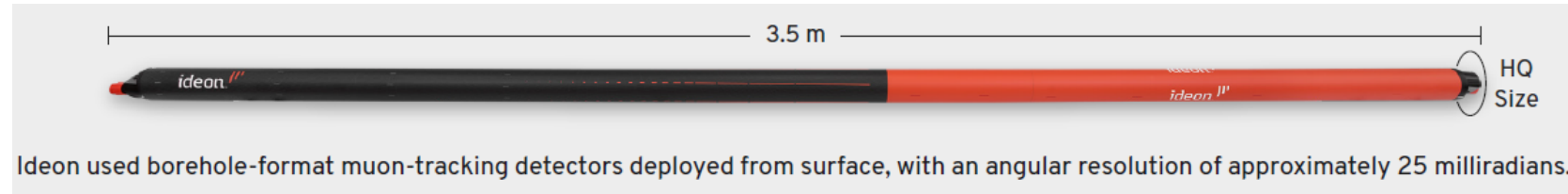
Мюонография рудных тел. Компания Ideon.



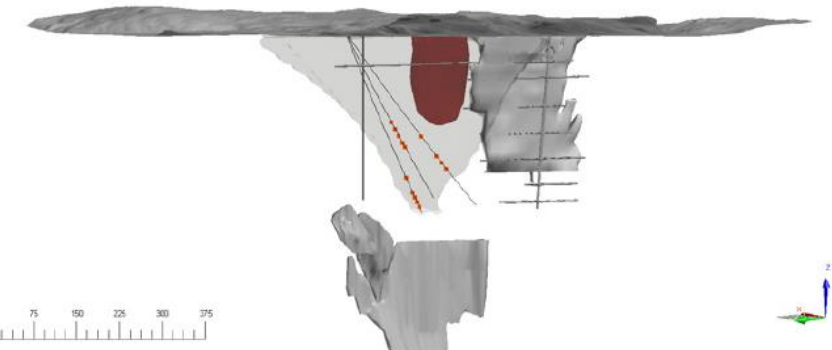
IDEON- один из крупнейших исследователей геологических задач; канадская группа, имеют большой опыт по мюонографии рудных тел, используют электронные детекторы различных конструкций

Скважинная конструкция детектора

Заявленная точность – 25 мрад (1,4 градуса)



Опубликованный пример работы – уточнение контура разведанного рудного тела, Месторождение Тоттен, Канада. Глубина 200-400м. Время – 6 месяцев.



Пример работы – 3D-контур разведанного рудного тела, обнаружение неразведанного рудного тела, никелевое месторождение Ленстер, Австралия. Глубина 200-450м. Время – 4.5 месяца

Мюнография рудных тел

Китайская группа из университета Ланьчжоу

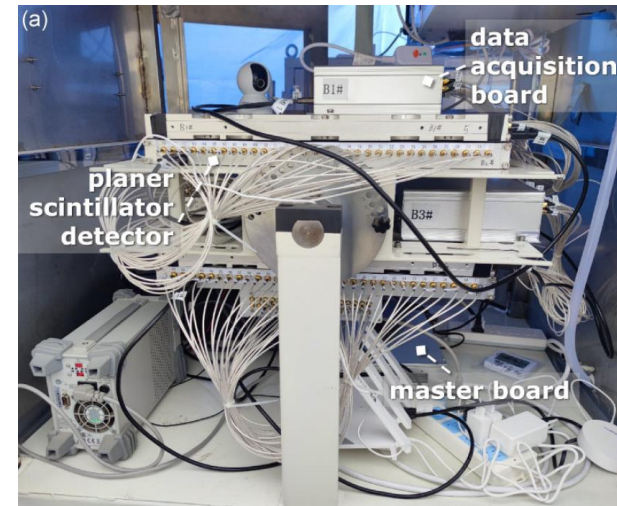
Шахта на глубине 200 метров. Время – 5 месяцев.

Заявленная точность 17мрад (0.97 градуса).

Используют электронные детекторы, подходящие для размещения в только в тоннеле или другом широком пространстве выработки.

Детекторы очень чувствительны к внешним условиям. Используют осушители, влагонепроницаемую ткань. Нужен мониторинг - камера наблюдения, измерители температуры, измерители влажности и способы дистанционного управления.

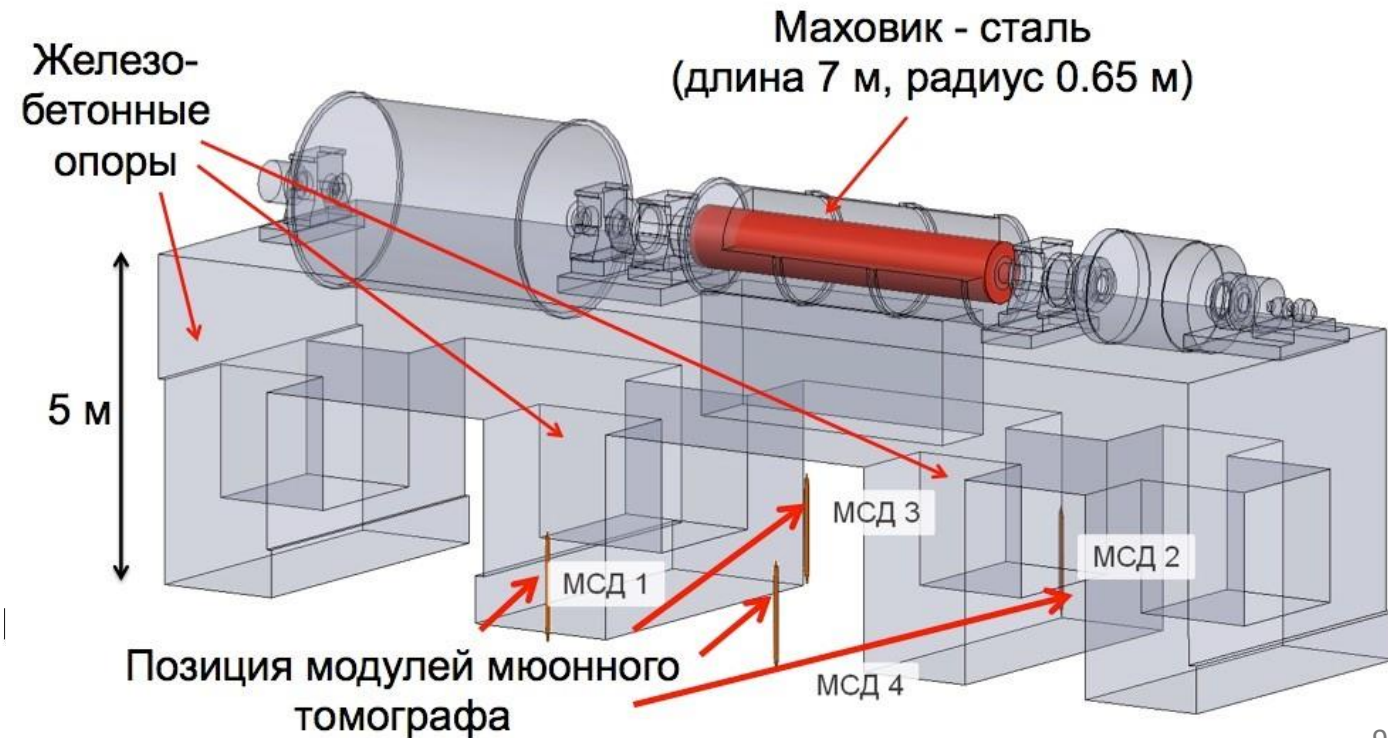
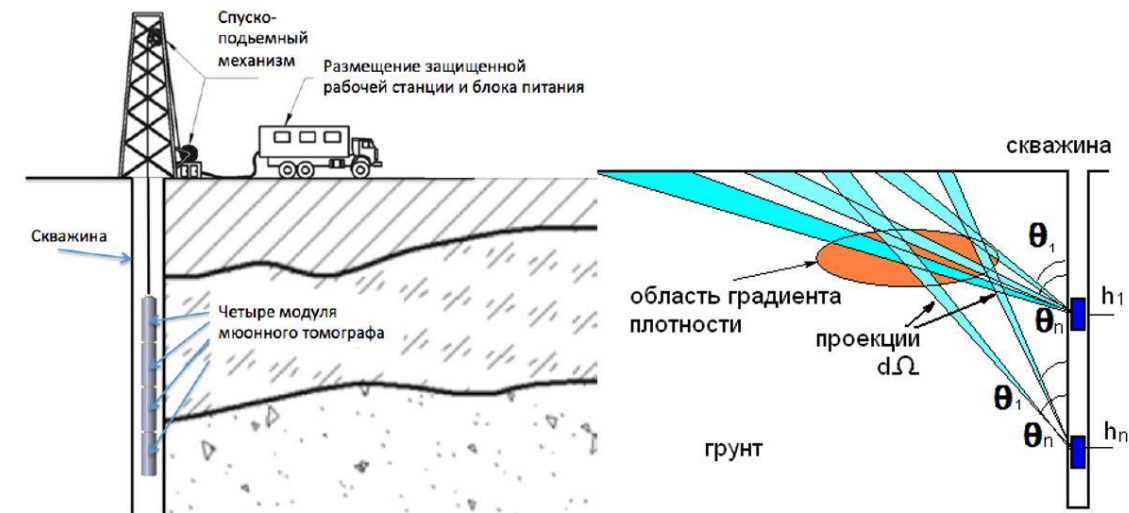
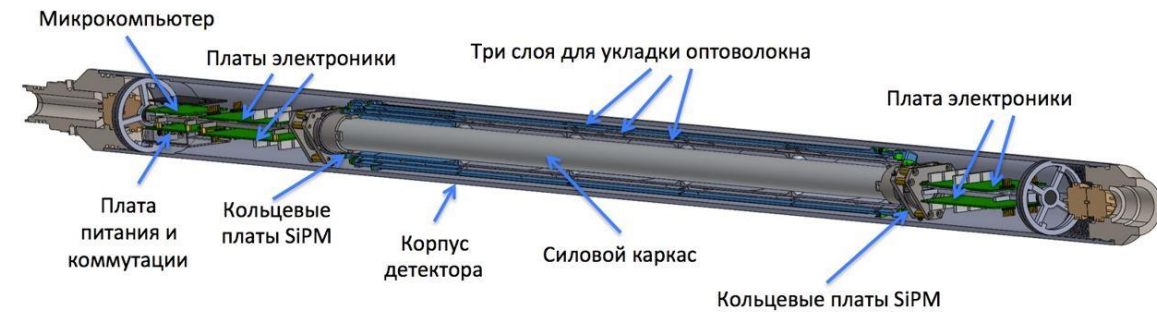
Золоторудное месторождение
Заозигоу в западном ЦиньЛине



Заявили об обнаружении неразведанного ранее рудного тела

ТРИНИТИ Россия

Разработка детектора в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»



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 ~ 100 м² 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.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ сформулированы основные результаты работы:

5. Реализован эксперимент по оценке минимального количества фотоэмульсионных слоев в детекторе для мюонографических экспериментов.
6. Проведены первые в России тестовые эксперименты по мюонографии с использованием эмульсионных детекторов, выработаны методические подходы для конструирования детекторов и определения оптимальных условий экспозиции.
7. Впервые в России проведена серия мюонографических 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 мюонографических 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.

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., Buonauro A., Consiglio L., D'Ambrosio N., De Lellis G., De Serio M., Di Capua F., Di Crescenzo A., Di Ferdinando D., Di Marco N., Fini R.A., Galati G., Giacomelli G., Grella G., Hosseini B., Kose U., Shchedrina T., Simone S., Tioukov V. Improving the detection efficiency in nuclear emulsion trackers // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 2015. Vol. 776, № 45–49.
6. OPERA collaboration, Shchedrina T. Discovery of tau Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment // Phys.Rev.Lett. 2015. Vol. 12.
7. Aleksandrov A.B., Bagulya A.V., Chernyavskiy M.M., Galkin V.I., Dedenko L.G., Fomenko N.V., Konovalova N.S., De Lellis G., Managadze A.K., Orurk O.I., Polukhina N.G., Roganova T.M., Shchedrina T.V., Sirignano C., Starkov N.I., Tan N.S., Tioukov V.E., Vladimirov M.S., Zemskova S.G. Test Experiments on muon radiography with emulsion track detectors in Russia // Phys.Part.Nucl.Lett. 2015. Vol. 12, № 5. P. 713–719.
8. Alexandrov A., Buonauro A., Consiglio L., D'Ambrosio N., De Lellis G., Di Crescenzo A., Di Marco N., Galati G., Lauria A., Montesi M.C., Pupilli F., Shchedrina T., Tioukov V., Vladymyrov M. A new fast scanning system for the measurement of large angle tracks in nuclear emulsions // JINST. 2015. Vol. 10, № 11. P. 11006.
9. Alexandrov A.B., Bagulya A.V., Chernyavskiy M.M., Konovalova N.S., Managadze A.K., Orurk O.I., Polukhina N.G., Roganova T.M., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Tioukov V.E., Vladymyrov M.S., Zemskova S.G. Muon radiography in Russia with emulsion technique. First experiments future perspectives // AIP Conf.Proc. 2015. Vol. 1702, № 1. P. 110002.
10. Alexandrov A.B., Vladymyrov M.S., Galkin V.I., Goncharova L.A., Grachev V.M., Vasina S.G., Konovalova N.S., Malovichko A.A., Okateva N.M., Polukhina N.G., Roganova T.M., Starkov N.I., Tioukov V.E., Chernyavskiy M.M., Shchedrina T.V. Muon radiography method for fundamental and applied research // Phys.Usp. 2017. Vol. 60, № 12. P. 1277–1293.
11. OPERA collaboration, Shchedrina T. Final Results of the OPERA Experiment on ν_τ Appearance in the CNGS Neutrino Beam // Phys.Rev.Lett. 2018. Vol. 21. P. 211801.

Основные публикации автора по тематике диссертации:

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.

Основные публикации автора по тематике диссертации:

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.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались автором на международных и российских конференциях:

1. International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2015), Athens, Greece, “Muon Radiography in Russia with emulsion technique. First experiments and future perspectives”, March 20th - 23rd, 2015.
2. The 3rd International conference on particle physics and astrophysics (ICPPA), MEPHI, Moscow, “Application of the muon radiography method to study the structure of massive objects”, October 2^d – 5th, 2017.
3. ISCRA 2019, “Muonography of large natural and industrial objects”, 25.06.2019.
4. XI Зацепинские чтения, ФИАН, Москва, “Исследование скрытых помещений Свято-Троицкого Данилова монастыря методом мюонной радиографии”, 28.05.2021.
5. ISCRA 2023, “A nuclear emulsion detectors for the muonography of underground structure of Holy Dormition Pskov-Caves Monastery”, 28.06.2023.

На международных Workshops по эмульсионной методике в **LHEP Bern University, Switzerland**:

«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.

Апробация работы

На **Collaboration meeting** 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 **Collaboration meeting** 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.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !