

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



ПАСЮК НИКИТА АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ГИБРИДНЫЙ МЮОННЫЙ ГОДОСКОП ДЛЯ МЮОНОГРАФИИ
ЭНЕРГОБЛОКА АЭС**

Специальность 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Научный руководитель: **Яшин Игорь Иванович**
доктор физико-математических наук, профессор, зам. руководителя Научно-образовательного центра НЕВОД НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: **Старков Николай Иванович**
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФИАН

Харлов Юрий Витальевич
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

Зинатулина Дания Раушановна
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора слабых взаимодействий Научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова ОИЯИ

Защита состоится «28» мая 2025 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.1.05 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан « ___ » _____ 2025 года

Учёный секретарь
диссертационного совета МИФИ.1.05,
д.ф.-м.н., профессор

Улин Сергей Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

На сегодняшний день активно развивается новое направление в экспериментальной физике – мюнография крупномасштабных объектов, структуру которых эффективнее всего исследовать с использованием проникающего излучения космических лучей – мюонов. Основой мюнографии (по аналогии с рентгенографией) является процесс регистрации и анализа пространственно-углового распределения мюонов, прошедших через изучаемый объект.

Для регистрации мюонов используются прецизионные мюонные годоскопы различных конструкций: ядерные эмульсии, сцинтилляционные детекторы, дрейфовые трубки, резистивные проекционные камеры и др. При этом каждый тип детектора имеет свои преимущества. Проецируя треки мюонов, зарегистрированные годоскопом, на референтную плоскость, проходящую через объект, можно получить (по аналогии с рентгенограммой) мюнограмму – распределение точек пересечения треков с плоскостью. Плотность этих точек на плоскости позволяет оценить распределение вещества в объекте, через который прошли зарегистрированные мюоны. Анализ их распределения на мюнограмме позволяет изучать особенности внутреннего строения крупных объектов. Мюнография, проведенная с нескольких пересекающихся углов, позволяет проводить трехмерное исследование структуры объекта, известное как мюонная томография. Метод мюнографии широко применяется для анализа внутренних структур таких объектов, как пирамиды, вулканы, горные массивы, ядерные реакторы, строительные сооружения и других крупномасштабных объектов.

Значимость мюнографии резко возросла при ликвидации последствий аварии на АЭС Фукусима-Даичи. Мюнография оказалась единственным методом, позволившим получить информацию о распределении расплавленного ядерного топлива в аварийных реакторах. Поэтому мониторинг работоспособности масштабных объектов атомных станций является важной и актуальной задачей, которую можно решить с помощью метода мюнографии и соответствующей аппаратуры. Кроме того существует большое количество других объектов критических инфраструктур, для которых мюнография является эффективным методом контроля: состояние контейнеров для хранения ядерных отходов, состояние плотин, дамб, мостов, металлургических домн, тоннелей, крупных строительных конструкций, таможенные терминалы для предотвращения контрабанды тяжелых делящихся веществ и др.

Эффективность использования годоскопов для реализации метода мюнографии во многом определяется чувствительностью площадью регистрации. Поэтому для обеспечения получения оперативных мюнограмм требуются детекторы большой площади. Разработка прецизионного широкоапертурного гибридного мюонного годоскопа, способного оперативно обнаруживать изменения в критической инфраструктуре в реальном времени, а также метода мюнографии крупномасштабных объектов является актуальной научной задачей.

Цель работы

Создание аппаратуры и разработка методов оперативной дистанционной мюнографии крупномасштабных объектов (в том числе ядерных реакторов).

Задачи работы

- 1) Разработка, создание и тестирование гибридной регистрирующей системы широкоапертурного мюонного годоскопа большой площади.
- 2) Разработка, создание и тестирование автоматизированного программно-аппаратного комплекса для сбора, обработки, хранения, анализа и визуализации информации в режиме реального времени.
- 3) Разработка методов формирования мюнограмм на основе данных гибридного мюонного годоскопа.
- 4) Экспериментальное исследование точностных характеристик годоскопа при получении мюнограмм тестовых объектов.
- 5) Моделирование метода мюнографии реакторного блока ВВЭР-1000.
- 6) Проведение экспериментальных исследований структуры энергоблока АЭС методом мюнографии и анализ полученных мюнограмм.
- 7) Разработка методики получения мюнограмм во время динамических изменений структуры объекта.

Научная новизна

Впервые:

- создан мобильный гибридный мюонный годоскоп для мюнографии крупных промышленных объектов на основе двух регистрирующих систем – стрипового сцинтилляционного детектора и детектора на дрейфовых трубках площадью 9 кв. м, с угловым разрешением около 2 мрад;
- разработана методика мюнографии крупномасштабных объектов на основе полученных изображений-мюнограмм с помощью гибридного мюонного годоскопа;
- разработана методика выделения изменений в структуре исследуемого объекта на основе разностного метода мюнографии;

– получены мюнограммы действующего энергоблока №4 Калининской АЭС в штатных условиях эксплуатации;

– реализована методика оперативного (около 1 суток) выделения зон изменений в структуре энергоблока АЭС с помощью созданного годоскопа.

Практическая значимость

Созданный мюонный годоскоп и разработанный метод мюнографии крупномасштабных промышленных объектов могут быть использованы для развития технологии дистанционного контроля состояний конструкций различных критических инфраструктур и являются основой для создания соответствующей аппаратуры для этих целей.

Разработанное программное обеспечение может быть использовано для других детекторов на аналогичных модулях считывания и обработки данных.

Модульная конструкция разработанного годоскопа может рассматриваться в качестве типовой при создании мюонных годоскопов для дистанционной диагностики различных объектов.

Личный вклад

Все работы были выполнены лично автором, либо при его определяющем участии:

1) Разработка, создание, сборка и тестирование регистрирующих систем и элементов детекторов на дрейфовых трубках и сцинтилляционных стрипах.

2) Разработка и создание автоматизированного программно-аппаратного комплекса, включающего средства сбора, обработки, хранения, анализа и отображения информации в режиме реального времени.

3) Разработка методов реконструкции одночастичных событий по данным двух детекторов гибридного мюонного годоскопа.

4) Моделирование процесса мюнографии энергоблока АЭС и сопоставление результатов с экспериментальными мюнограммами.

5) Разработка методики формирования мюнограмм по данным гибридного мюонного годоскопа.

6) Исследование точностных характеристик гибридного годоскопа.

7) Получение и анализ экспериментальных результатов.

8) Разработка методики выделения изменений в структуре энергоблока АЭС по данным мюнографии.

9) Подготовка публикаций и выступлений.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1) Разработка, создание и обеспечение работоспособности широкоапертурного многоканального гибридного мюонного годоскопа,

состоящего из сцинтилляционных стрипов с кремниевыми фотоумножителями и дрейфовых трубок для регистрации мюонов в режиме реального времени.

2) Программно-аппаратный комплекс системы регистрации, триггирования, сбора и обработки данных в режиме реального времени.

3) Методика реконструкции одночастичных событий по данным гибридного мюонного годоскопа.

4) Методика получения статических и динамических мюонограмм по данным гибридного мюонного годоскопа.

5) Результаты исследования точностных характеристик гибридного годоскопа.

б) Полученные мюонограммы АЭС.

Достоверность результатов

1) Технические решения и экспериментальные подходы, использованные при создании гибридного мюонного годоскопа, основывались на разработках, апробированных в экспериментальном комплексе НЕВОД (НИЯУ МИФИ) при создании двух поколений мюонных годоскопов большой площади, а также при создании детекторов на дрейфовых трубках в установке ATLAS (LHC).

2) Гибридный мюонный годоскоп был сертифицирован как средство измерения по результатам калибровочных экспериментов в НИЯУ МИФИ (сертификат об утверждении типа средств измерений Росстандарта №87385-22 от 23 ноября 2022 г.).

3) Программное обеспечение информационно-измерительной системы, на которое получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022663395 от 14 июля 2022 г., разработано с применением современных методов, алгоритмов и принципов реализации программного обеспечения.

Апробация результатов работы

Основные результаты исследований по теме диссертации представлены автором на 8 российских и международных конференциях в течение 5 лет (2020-2024 гг.):

1) 36-я Всероссийская конференция по космическим лучам (Дубна 2020).

2) Международная научная школа-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (НИЯУ МИФИ 2022, 2023, 2024).

3) Черенковские чтения (ФИАН 2023).

4) Симпозиум IS CRA (НИЯУ МИФИ 2023).

5) Международная научно-практическая конференция «Современное состояние и перспективы развития атомной промышленности в Республике Казахстан» (Алматинский филиал НИЯУ МИФИ 2023).

6) 38-я Всероссийская конференция по космическим лучам (ФИАН 2024).

Основные положения диссертации опубликованы в 6 рецензируемых научных изданиях, включенных в базы научных данных ВАК, Scopus и Web of Science. По научно-техническим разработкам в составе коллектива авторов получены патент на изобретение, сертификат утверждения средства измерения и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности. Список всех работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Объем диссертации: 143 страниц, 117 рисунков, 1 таблица, 112 наименования цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и новизна исследуемой научной проблемы – создания аппаратуры и методов диагностики крупномасштабных объектов. Представлены цель и задачи решения данной проблемы путем разработки гибридного мюонного годоскопа и реализации на нем разностного метода мюонографии. Приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту. Рассмотрены практическая значимость и личный вклад автора.

В первой главе приводится описание, актуальность и особенности метода мюонографии, а также даётся обзор экспериментов по мюонографии различных объектов.

Мюонография (по аналогии с рентгенографией) представляет собой метод неразрушающего контроля и визуализации структуры объектов с помощью проникающей компоненты космических лучей – атмосферных мюонов. Мюонография имеет ограничения, вызванные зависимостью потока и средней энергии мюонов на поверхности от косинуса зенитного угла [1-3], требующие использования детекторов большой площади и длительных измерений.

Анализ изменений в пространственно-угловом распределении мюонов при прохождении через крупномасштабный объект может дать информацию о массовом составе и распределении плотности вещества, через которое они пролетели. Для регистрации этого потока применяются специальные прецизионные трековые детекторы – годоскопы [4]. Проецируя зарегистрированные годоскопом треки мюонов в обратном направлении на некоторую референтную плоскость, проходящую через объект (Рис. 1), можно получить мюонограмму – двумерную матрицу с распределением плотности точек пересечения треков частиц по плоскости. На мюонограмме (по аналогии с рентгенограммой) отображаются особенности структуры объекта между входящим потоком мюонов и детектором. Мюонограммы объекта, полученные с различных пересекающихся направлений, позволяют провести трехмерный анализ (томографию) структуры объекта.

Для реализации методов мюонографии в основном применяются детекторы на основе ядерных эмульсий, сцинтилляторов, газовых трубок и полупроводников, состоящие из последовательно расположенных регистрирующих координатных плоскостей. Каждая плоскость фиксирует с некоторой точностью точку, через которую прошла частица. Данные с различных плоскостей дают возможность реконструировать трек.

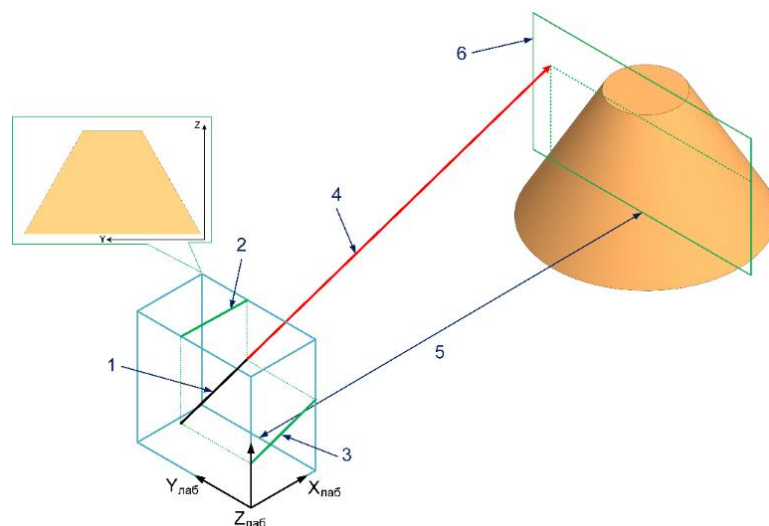


Рис. 1. Схема построения мюнограмм: 1 – реконструированный трек; 2 – XY-проекция; 3 – XZ-проекция; 4 – спроецированный трек; 5 – расстояние до референтной плоскости; 6 – референтная плоскость.

Мюнография может быть реализована двумя методами: метод, на основе анализа многократного кулоновского рассеяния мюонов, и метод на основе их поглощения.

Рассеяние мюонов на ядрах зависит от импульса, атомного числа Z и радиационной длины X_0 . Для реализации этого метода используются два независимых детектора, размещенные по обе стороны исследуемого объекта, которые фиксируют треки мюонов до и после прохождения через объект. Такой подход позволяет обнаруживать аномальные области с различным значением Z и классифицировать их. Однако данный метод становится практически неприменим при значительных толщинах исследуемого объекта, поскольку процессы поглощения мюонов затрудняют распознавание аномальных участков.

Метод поглощения мюонов анализирует потери мюонов в веществе, которые возникают в основном за счет ионизации. Для его реализации используется один детектор, который направлен на объект наблюдения. Этот метод часто применяется на практике и эффективен для исследования крупных объектов. Однако его точность ограничена эффектом рассеяния мюонов на больших толщинах материала, что усложняет локализации областей с различной плотностью. Метод поглощения обладает интегральным эффектом и не позволяет проводить наблюдение изменений в структуре объекта в течение длительной экспозиции. Для реализации возможности локализации на мюнограмме областей с изменениями изучаемого объекта был предложен разностный метод построения мюнограмм, разработанный в НОЦ НЕВОД (НИЯУ МИФИ) [4].

В основе разностного метода лежит получение разностной мюнограммы M_δ , которая формируется при вычитании из статической мюнограммы M_c мюнограммы с изменениями M_d . Статическая мюнограмма M_c формируется по результатам длительной экспозиции, в течение которой никаких изменений в точке наблюдения не было. Динамическая мюнограмма M_d соответственно получается во время предполагаемых изменений в наблюдаемом объекте. Матрица M_c нормируется на статистику матрицы M_d . Значения ячеек разностной матрицы M_δ находятся по формуле:

$$M_\delta = \frac{M_d - M_c \cdot d}{\sqrt{M_c \cdot d}}, \quad (1)$$

где d – нормировочный коэффициент, рассчитанный по формуле:

$$d = \frac{\sum_{i,j} (M_d[i,j])}{\sum_{i,j} (M_c[i,j])}, \quad (2)$$

где i – номер строки, а j – номер столбца ячейки матрицы.

Для более четкого проявления отклонений, связанных с изменениями в структуре объекта, при вычитании матриц дополнительно применяется гауссов фильтр низких частот [5], который учитывает вес каждой ячейки матрицы. Для изучения мюнографии крупномасштабных объектов методом поглощения было проведено моделирование [6] с использованием программного пакета Virtual Monte Carlo, где реализованы средства описания различных материалов и создания сложных геометрий. В данной программе была создана модель реактора ВВЭР-1000 и его основных конструкций (Рис. 2): бассейнов, парогенераторов, насосов и системы охлаждения.

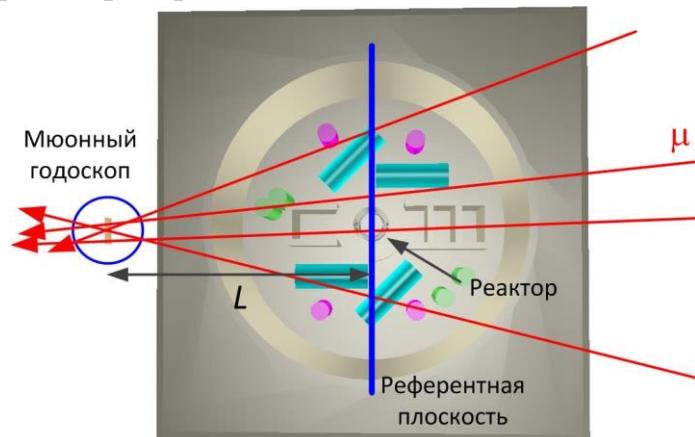


Рис. 2. Модель реакторного здания АЭС.

Модель мюонного годоскопа площадью 3×3 м² располагалась на расстоянии 5 м от стены реакторного здания (примерно 40 м от центра активной зоны). В результате обработки данных и реконструкции треков частиц были построены мюнограммы на референтной плоскости,

проходящей через центр детектора. Пример мюнограммы, полученной по модельным данным «прямым» способом, показан на Рис. 3. Множество точек в поле матрицы позволяет определить области высокой и низкой плотности вещества. Цветом показано количество треков в ячейке матрицы.

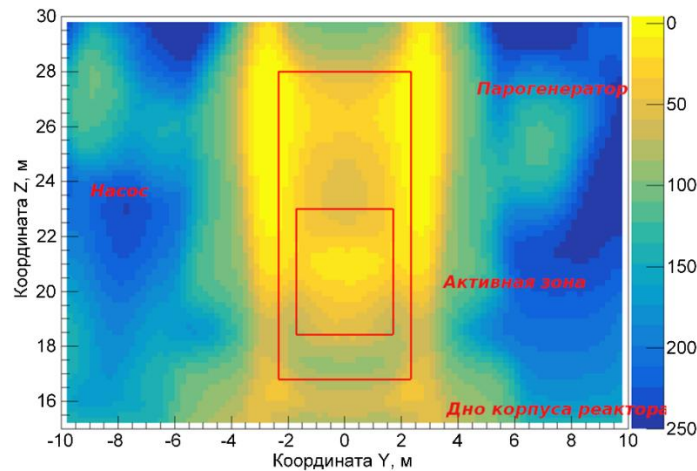


Рис. 3. Пример модельной мюнограммы реактора.

Оперативность и информативность подхода к получению мюнограмм значительно увеличиваются при использовании разностного метода. Для этого было проведено сравнение результатов моделирования конструкции ядерного реактора со стандартным заполнением с результатами моделирования ядерного реактора с измененным состоянием. Примеры результатов применения разностного метода для разных случаев показаны на Рис. 4. Локализация зон изменений при таком подходе выделяется существенно лучше.

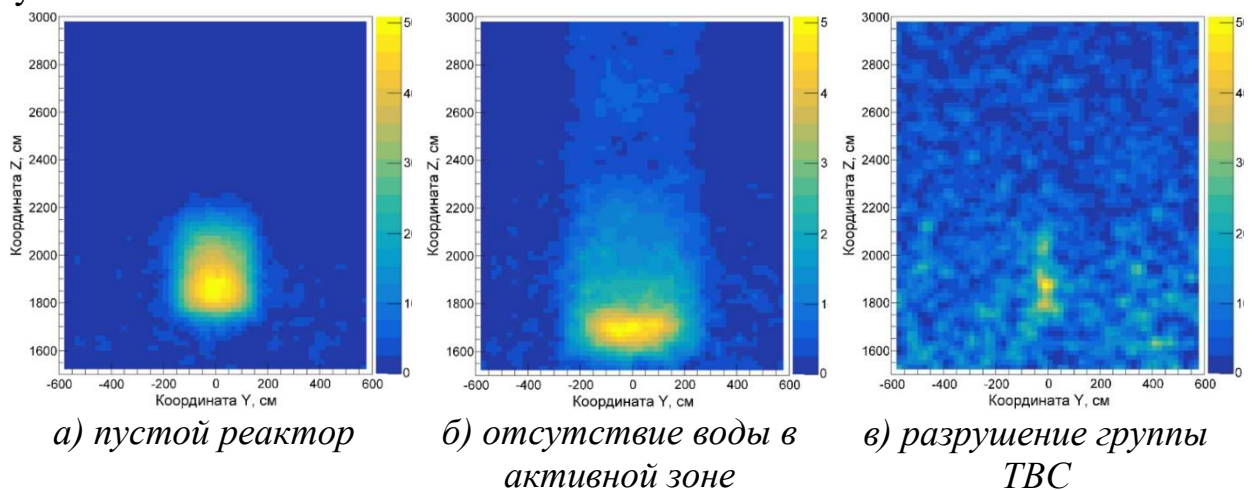


Рис. 4. Разностная мюнограмма зоны реактора.

Во второй главе описываются конструкция, элементы и принципы функционирования разработанного гибридного мюонного годоскопа. Приведена информация о сцинтилляционном и дрейфовом детекторах, а также о методах реконструкции трековых событий по их данным.

Гибридный мюонный годоскоп (ГМГ), идея которого отражена в патенте на изобретение RU2761333C1 [7], представляет собой устройство для неразрушающего контроля промышленных и других крупномасштабных объектов с помощью метода мюнографии.

Конструкция ГМГ имеет модульную структуру (Рис. 5) и состоит из 10 чередующихся ортогонально ориентированных однопроекционных координатных плоскостей (ОКП) с чувствительной площадью $3 \times 3 \text{ м}^2$ каждая, из которых 6 плоскостей составляют сцинтилляционный стриповый детектор (ССД) и 4 плоскости – детектор на дрейфовых трубках (ДДТ). Все плоскости объединены в основной несущей раме, закрепленной на поворотной платформе (Рис. 5), смонтированной на мобильном модуле на двухосном шасси с выдвигающимися опорами.

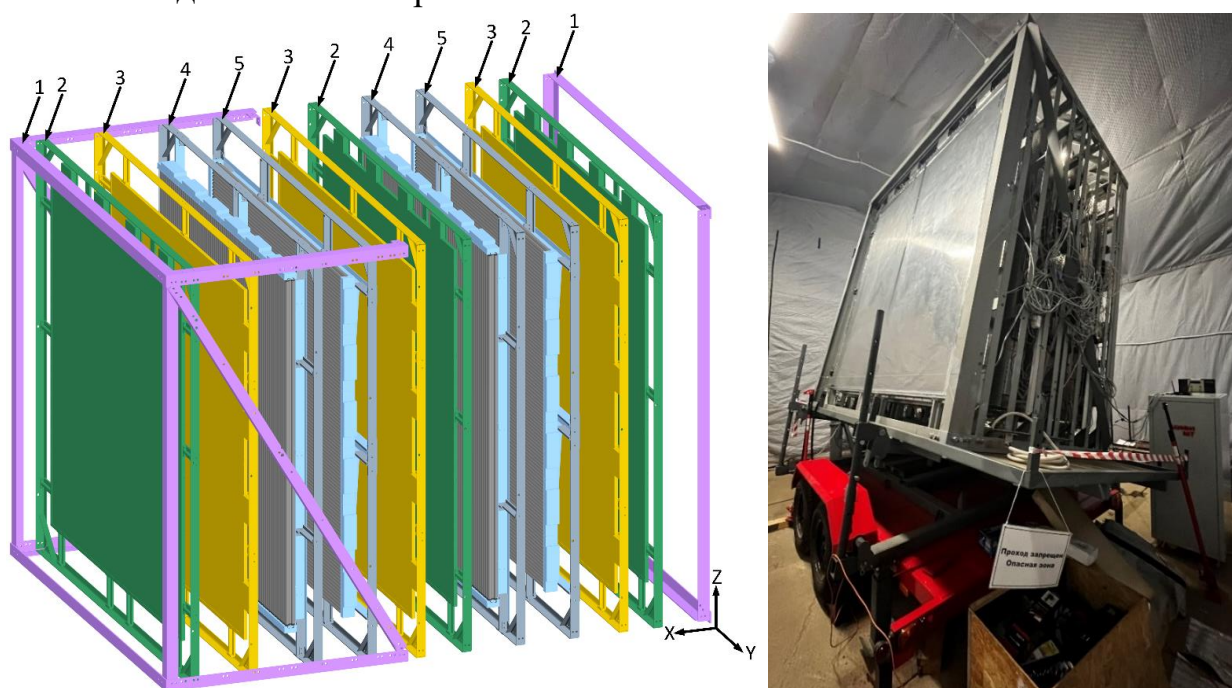


Рис. 5. 3D-модель ГМГ (слева) и собранная конструкция ГМГ с модулем подвижности (справа): 1 – основная несущая рама; 2 – плоскость ССД с вертикально-ориентированными стрипами; 3 – плоскость ССД с горизонтально-ориентированными стрипами; 4 – плоскость ДДТ с вертикально-ориентированными трубками; 5 – плоскость ДДТ с горизонтально-ориентированными трубками.

Плоскости ДДТ состоят из двух состыкованных без зазора камер на дрейфовых трубках. Каждая камера представляет собой трехслойную сборку 144 дрейфовых трубок длиной 3000 мм и диаметром 30 мм, заполненных газовой смесью Ar-CO_2 в соотношении 93%-7%. Разработка и производство трубок осуществлялись в НИЦ «КИ»-ИФВЭ (г. Протвино). Плоскости ССД состоят из двух состыкованных без зазора базовых модулей. Каждый базовый модуль представляет собой светоизолированную однослойную сборку из 64

длинных узких прямоугольных сцинтилляционных стрипов (3000×23×7 мм) с оптоволоконным светосбором на кремниевые фотоумножители (SiPM) Hamamatsu S13360-1350CS.

Конструкция ГМГ состоит из двух регистрирующих систем и системы мониторинга периферийных устройств. Для каждой системы была реализована своя независимая система сбора и обработки данных с отдельным компьютером. На разработанный программный комплекс было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022663395 «Программа MuonGraph 1.01 для управления, сбора и обработки данных гибридного мюонного томографа».

Реконструкция параметров трека в детекторах основывается на его регистрации несколькими ОКП. Каждая координатная плоскость при пролёте через неё мюона дает информацию о сработавших каналах, что позволяет оценить координату точки пересечения. Данные нескольких координатных плоскостей с соответствующей ориентацией стрипов (трубок) позволяют восстановить трек в проекционных плоскостях XU и XZ лабораторной системы координат. По восстановленным трекам затем строится теневое изображение (мюонограмма) исследуемого объекта в потоке мюонов.

Для реконструкции событий в ДДТ используется информация о координатах центров сработавших трубок и их временах срабатывания. По данной информации строится $r(t)$ -зависимость, которая показывает радиальное расстояния до точки начала ионизации (точка пролета частицы) в зависимости от времени дрейфа электронов до сигнальной проволоки. Далее выполняется кластеризация трубок по времени срабатывания. Между смежными трубками в камере через уравнение прямой находится касательная, оптимальным образом описывающая окружности в сработавших кластерах. Параметры трека получаются в результате минимизации функционала методом наименьших квадратов, основанном на алгоритме Левенберга-Марквардта [8]:

$$\chi^2(a,b,c) = \sum_i^N \frac{(a \cdot y_i + b \cdot x + c - r_i)^2}{(\sigma_{r_i})^2}, \quad (3)$$

где N – количество сработавших трубок, значение σ_r учитывает время прохождения сигнала по проволоке, время пролета мюона, собственное разрешение трубок и вклад многократного рассеяния на материале детектора.

Далее проводится поиск сегментов в разных камерах, принадлежащих одной проекции трека. Для этого в каждой камере одной проекции по найденным прямым (сегментам трека частицы) ищутся подобные, угол между которыми не превышает $\Delta\varphi = 5$ градусов. На следующем шаге происходит

сшивки двух сегментов. Для этого через каждый сегмент трека проводится плоскость параллельно направлению трубок.

После нахождения проекционных плоскостей треков в отдельных камерах они сопоставляются между собой нахождением уравнения общей поверхности (4) через вектор нормали к поверхности $\vec{n} = (A, B, C)$:

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0, \quad (4)$$

$$A = \frac{V_x}{|\vec{V}|}; B = \frac{V_y}{|\vec{V}|}; C = \frac{V_z}{|\vec{V}|}; D = -\frac{(\vec{P}_1 \cdot \vec{V})}{|\vec{V}|}, \quad (5)$$

$$\vec{V} = \overrightarrow{(P_2 - P_1)} \times \overrightarrow{(P_3 - P_1)}, \quad (6)$$

где A, B, C – единичные векторы в соответствующих осях; D – расстояние от начала системы координат до рассматриваемой плоскости; P_1 и P_2 – середины проекции первой ОПК в $X_{\text{ЛОК}}^{\text{ДЛТ}}$ -координате начала и конца рабочей зоны трубки соответственно; P_3 и P_4 – середины проекции второй ОПК в $X_{\text{ЛОК}}^{\text{ДЛТ}}$ -координате начала и конца рабочей зоны трубки соответственно.

Аналогичным образом находится плоскость в другой проекции. После этого по нормализованному векторному произведению перпендикуляров двух пересекающихся плоскостей (7) находятся направляющие косинусы искомой прямой линии, которая и будет являться треком частицы.

$$\begin{cases} A_1 \cdot x + B_1 \cdot y + C_1 \cdot z + D_1 = 0; \\ A_2 \cdot x + B_2 \cdot y + C_2 \cdot z + D_2 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Для реконструкции трека в ССД проверяется наличие не менее трёх одновременно сработавших Y -плоскостей и не менее трёх Z -плоскостей, поскольку это позволяет эффективно выделять события с одиночными мюонами среди многочастичных событий. Поиск трека проводится последовательно для XU и XZ -проекций с использованием алгоритма поиска «прямолинейного» участка по координатам сработавших стрипов.

Алгоритм основывается на последовательном переборе всех сработавших стрипов и поиске всех возможных «прямолинейных» участков. Для окончательной реконструкции трека используются координаты центров сработавших стрипов, для которых прямая линия описывается наилучшим образом при заданных критериях отбора. Процедура поиска проводится для Y и Z -стрипов независимо (для XU и XZ -проекций ССД). Далее по полученным проекциям трека находится трек в пространстве.

В третьей главе представлены результаты тестирования основных элементов разработанного гибридного мюонного годоскопа на специализированных стендах.

Основная проверка работоспособности камер на дрейфовых трубках и отработка методики их тестирования выполнялась в НИЦ «КИ»-ИФВЭ перед

отправкой в НИЯУ МИФИ. В дальнейшем на разных этапах разработки ГМГ по аналогичной методике проводился промежуточный контроль каждой камеры. Подробное описание методики контроля камер в лабораторных условиях приведено в [9]. При тестировании ДДТ проверялись герметичность, зависимость рабочего напряжения от давления газа, счетная характеристика и функция зависимости времени дрейфа в трубке от радиуса пролета частицы.

Для ССД проводилось измерение световыходов стрипов и его ослабление по длине с использованием автоматизированного измерительного стенда [10]. Средний световой выход стрипов от мюонов в точке 50 см от SiPM составил 32.71 ± 0.13 фотоэлектрона, а в точке 250 см 23.41 ± 0.12 фотоэлектрона.

У SiPM исследовалась зависимость коэффициента усиления от напряжения питания. Для первой партии SiPM с паспортным напряжением питания 53.7 В средний коэффициент усиления составил 1.38×10^6 , а для партии с напряжением питания 55.2 В – 1.39×10^6 . Результаты тестирования показали линейную зависимость коэффициентов усиления от напряжения питания и позволили сконфигурировать платы считывания на нужное напряжение питания, обеспечивающее коэффициент усиления SiPM 1.2×10^6 . Сопоставление результатов тестирования SiPM с результатами тестирования стрипов позволило распределить регистрирующие каналы ССД так, чтобы их передаточные характеристики были достаточно равномерными.

Четвертая глава посвящена методике и результатам испытания прототипа гибридного мюонного годоскопа в НИЯУ МИФИ. Приводится описание прототипа ГМГ (ПГМГ) и эксперимента по мюонографии тестовых объектов.

В специальном ангаре была создана временная подвесная конструкция ПГМГ (Рис. 6), включающая в себя прототип ССД, ДДТ, триггерную систему, системы сбора и обработки данных. ПГМГ состоял из четырех плоскостей ДДТ в полной конфигурации (1152 дрейфовые трубки) и уменьшенный прототип сцинтилляционного детектора – шесть базовых модулей ССД (384 сцинтилляционных стрипа). Координатные плоскости ССД из 64 стрипов были установлены на разных высотах для оптимального захвата регистрируемых мюонов.

Цель эксперимента в НИЯУ МИФИ заключалась в проверке работы систем и методов обработки данных, а также локализации по данным ПГМГ тестовых объектов – сборок свинцовых кирпичей, распложенных на разных точках и высотах в пределах апертуры детектора (Рис. 7).

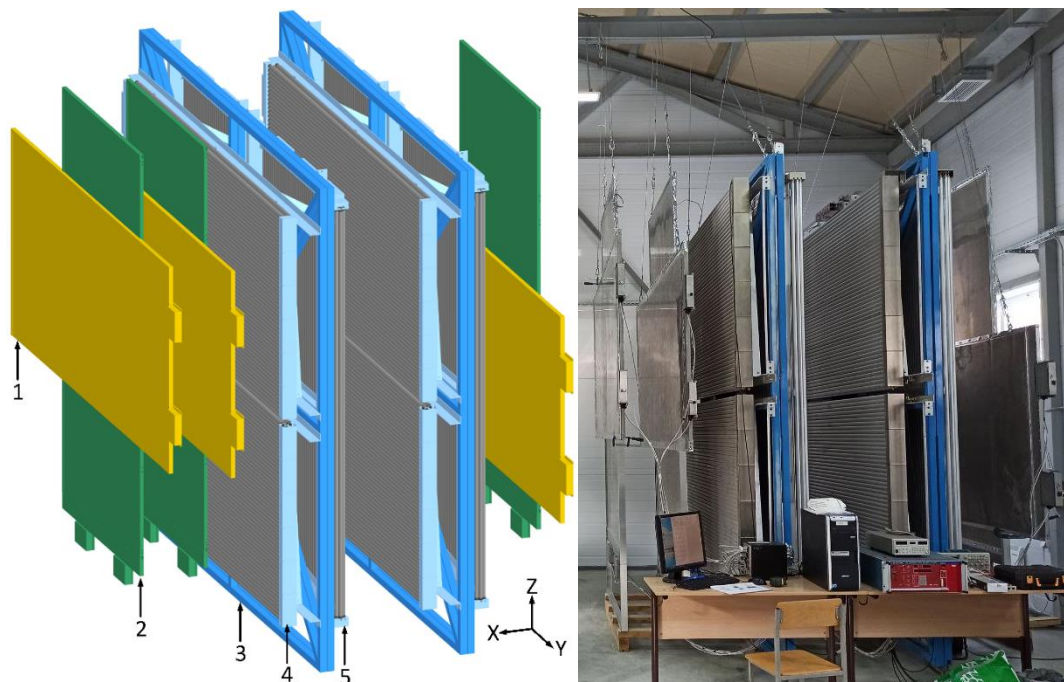


Рис. 6. 3D-модель (слева) и собранная конструкция (справа) ПГМГ: 1 – плоскость ССД с горизонтально-ориентированными стрипами; 2 – плоскость ССД с вертикально-ориентированными стрипами; 3 – несущая рама модуля ДДТ; 4 – плоскость ДДТ с горизонтально-ориентированными трубками; 5 – плоскость ДДТ с вертикально-ориентированными трубками.



Рис. 7. Схема расположение тестовых объектов на карте.

На первом этапе были получены базовые мюнограммы без тестовых объектов. После завершения набора базовых матриц были установлены тестовые объекты (свинцовые сборки $20 \times 20 \times 20.5$ см и $40 \times 40 \times 43$ см) в пределах апертуры на разных расстояниях и высотах. Для каждого положения объекта были получены соответствующие мюнограммы.

Из-за небольшого размера искомых объектов относительно области наблюдения они не выделяются явно на матрицах. Для их выделения из общего фона были построены разностные матрицы: из текущей матрицы с объектом вычиталась базовая матрица без объекта с учетом статистической

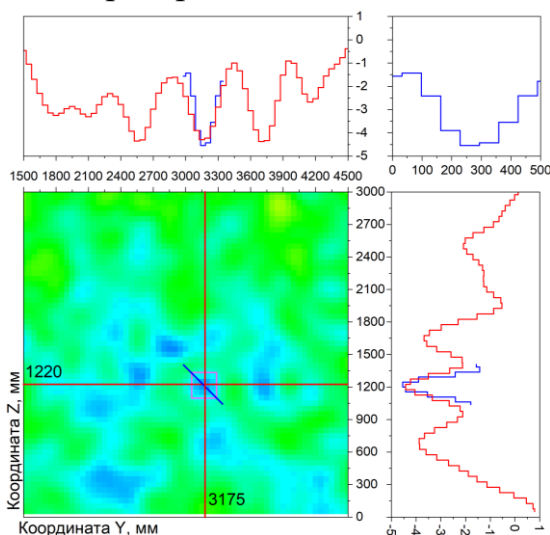
нормировки (1). На основе полученных разностных матриц-мюнограмм (Рис. 8) проводился анализ, который позволил определить расположение и размеры тестовых объектов. Синий цвет на матрицах отображает недостаток событий, красный – избыток, а розовый квадрат – ожидаемые размеры и местоположение искомого объекта.

На представленных матрицах присутствует несколько областей с недостатком событий, что, помимо добавленной мишени, может быть обусловлено флуктуациями в регистрируемых данных, связанными с их ограниченной статистической обеспеченностью, а также возможными изменениями эффективности регистрации ОКП. Так как геометрические координаты тестовых объектов были известны, то это дало возможность выделить объекты на мюнограммах на фоне статистических и систематических областей анизотропии.

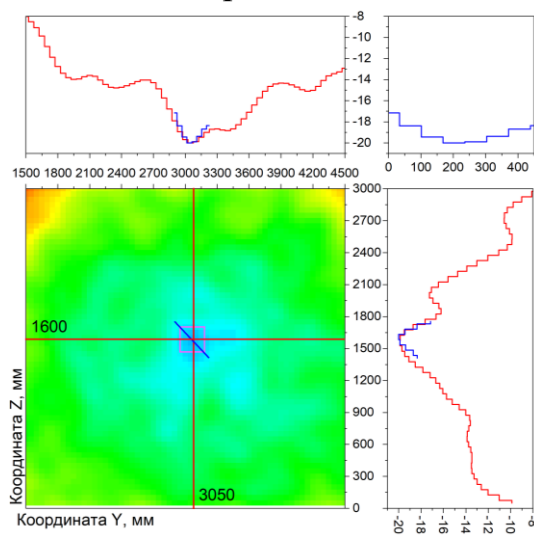
По гистограммам определены размеры наблюдаемых объектов. Средние отклонения в размерах по измеренным данным составили ± 10 мм на расстоянии 7.3 м от начала координат и ± 100 мм на расстоянии 37.5 м.

В результате анализа разностных мюнограмм были получены следующие оценки точностных характеристик детекторов:

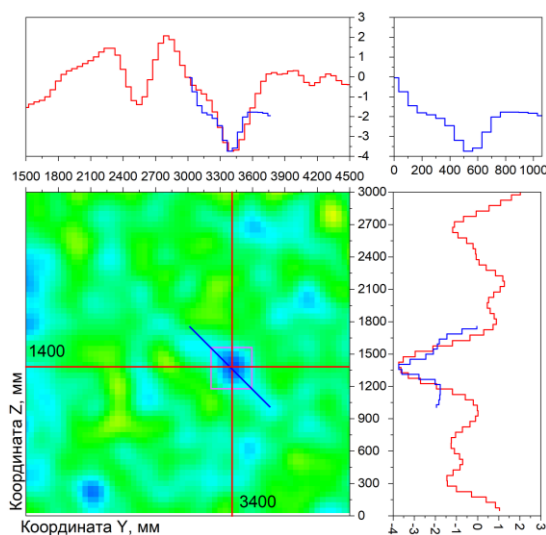
- угловая точность сцинтилляционного детектора: < 12 мрад;
- пространственная точность сцинтилляционного детектора: ~ 7 мм;
- угловая точность дрейфового детектора: < 2 мрад;
- пространственная точность дрейфового детектора: ~ 3 мм.



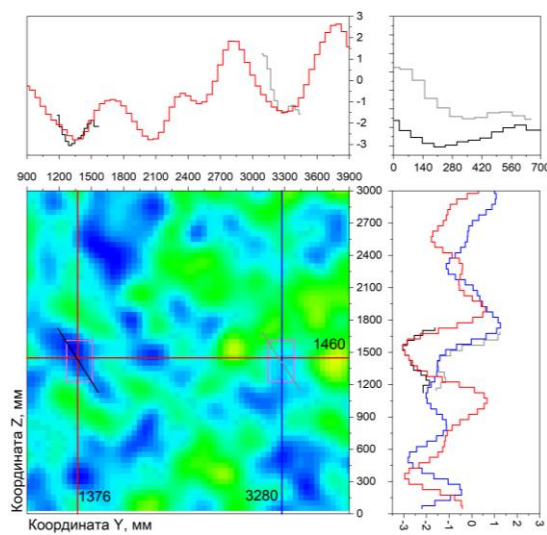
а) ДДТ, объект на расстоянии 7.3 м и высоте 3.2 м



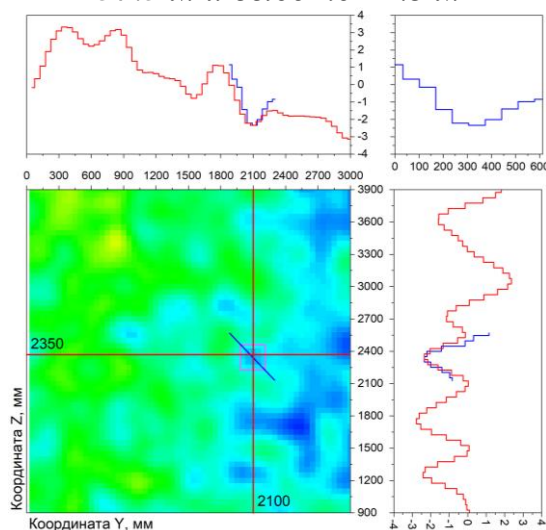
б) ДДТ, объект на расстоянии 7.3 м и высоте 3.6 м



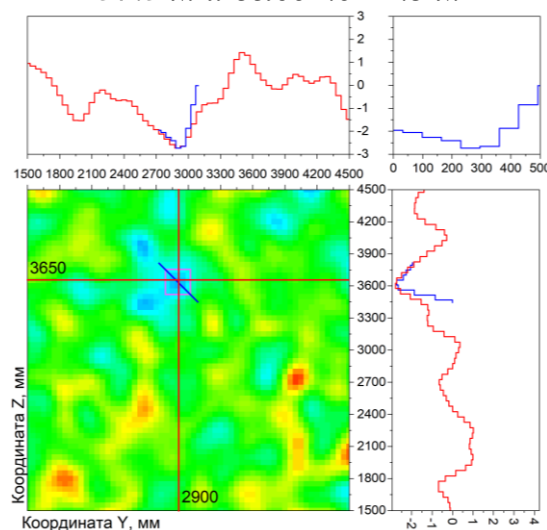
в) ДДТ, объект на расстоянии 37.5 м и высоте 12.3 м



г) ДДТ, два объекта на расстоянии 37.5 м и высоте 12.3 м



д) ДДТ, объект на расстоянии 15.2 м и высоте 4.4 м



е) ССД, объект на расстоянии 7.3 м и высоте 3.6 м

Рис. 8. Разностные матрицы ПГМГ.

В пятой главе приведены результаты моделирования мюнографии энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 и результаты испытания гибридного мюонного годоскопа на Калининской АЭС, где были реализованы разработанные методы реконструкции и построения мюнограмм.

Для отработки методов реконструкции событий, построения мюнограмм, проверки отклика детекторов на мюон и оценки точностных характеристик было проведено моделирование эксперимента с использованием специально разработанной программы на языке C++. Программа использует модельные спектры частиц, полученные с помощью программного пакета CORSIKA версии 7.7500 с описанием адронных взаимодействий по моделям QGSJET-II-04 и FLUKAINFN2021.2.9.

Моделировался энергоблок АЭС (Рис. 9), который представлялся как комбинация элементарных геометрических фигур с заданной плотностью внутреннего объема. Дополнительные помещения внутри гермооболочки не моделировались. При прохождении через вещество многократное кулоновское рассеяние не учитывалось.

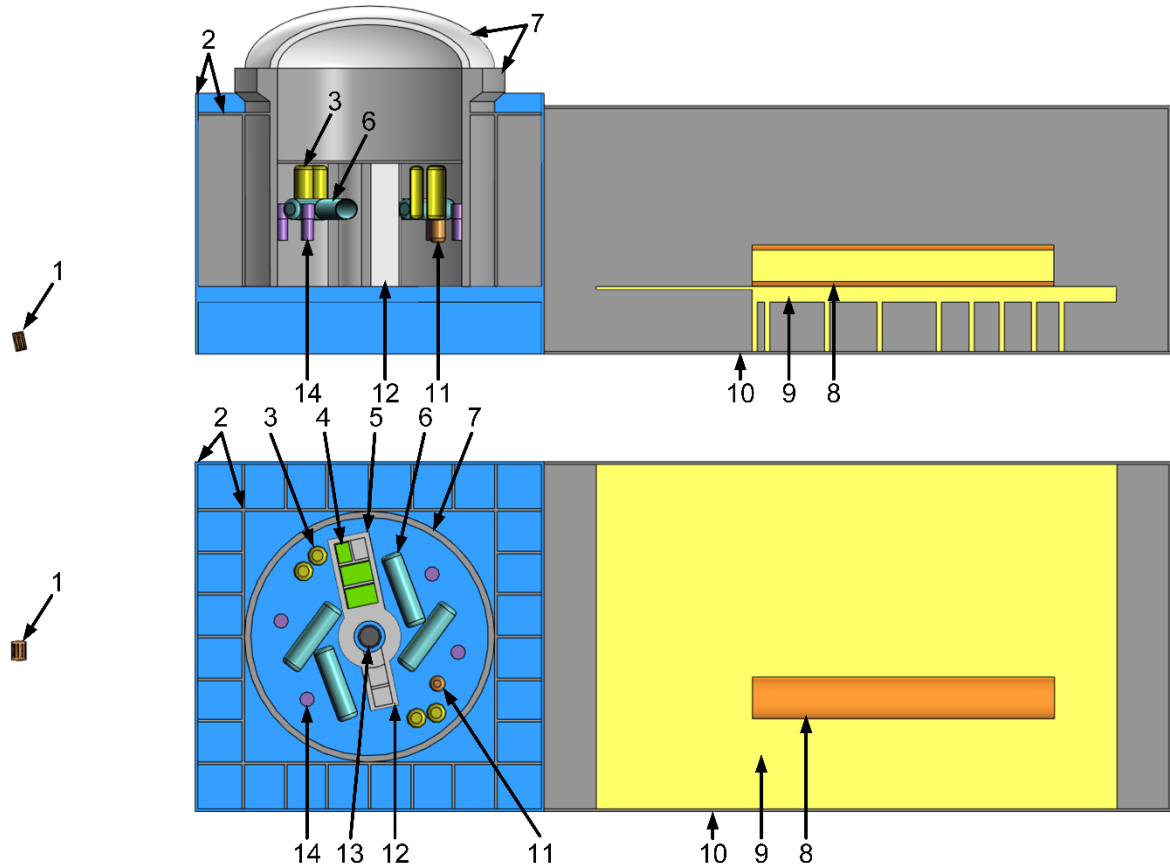


Рис. 9. Упрощенная модель энергоблока: 1 – ГМГ; 2 – стены обстройки реакторного отделения; 3 – система аварийного охлаждения; 4 – тепловыделяющие сборки; 5 – бассейн выдержки; 6 – парогенератор; 7 – гермооболочка; 8 – турбогенератор; 9 – верхняя площадка машинного зала; 10 – стены машинного зала; 11 – компенсатор давления; 12 – бассейн перегрузки; 13 – реактор; 14 – главный циркуляционный насос [11].

Моделирование эксперимента включало несколько этапов. В начале моделировался мюонный поток без каких-либо объектов в апертуре детектора. Восстанавливались треки частиц, прошедшие через детектор, по которым на референтной плоскости строилась матрица-мюонограмма $M^{\text{мод}}$. Затем моделирование повторялось уже с энергоблоком, и для заданной референтной плоскости формировалась матрица распределения точек пересечения треков $M_1^{\text{мод}}$. После этого по соответствующим ячейкам матриц находилась матрица отклонений $D^{\text{мод}}[i,j]$ матрицы числа треков с энергоблоком $N_{1i,j}$ относительно матрицы числа треков без энергоблока $N_{i,j}$ с учётом коэффициента нормировки на статистику B : $D^{\text{мод}}[i,j] = N_{1i,j}/(B \cdot N_{i,j})$, где $B = \sum_{i,j}(N_{1i,j})/\sum_{i,j}(N_{i,j})$.

Зная углы (θ, φ) направлений восстановленных треков на центры этих ячеек матрицы $M_1^{\text{мод}}$, площади ячейки $S(i,j)$ в проекции на направления (θ, φ) и расстояние до референтной плоскости, рассчитывались соответствующие телесные углы $\Omega(i,j)$ каждой ячейки, после чего оценивалась интенсивность потока мюонов $[\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}]$ за единицу времени dt с учётом эффективности регистрации ε детектора:

$$I(i,j) = \frac{N(i,j)}{S(i,j) \cdot \Omega(i,j) \cdot \varepsilon \cdot dt} \quad (8)$$

Для каждой ячейки находилась толщина вещества, которая обеспечивает изменение интенсивности мюонов в данной ячейке, связанной с потерями энергии частиц в элементе телесного угла. Для получения матрицы толщин была использована расчетная таблица зависимости интенсивности потока мюонов от зенитного угла и пороговой энергии. Для каждой ячейки модельной матрицы без энергоблока находилась такая пороговая энергия $E_{ij}^{\text{мод}}$, при которой интенсивность потока по сравнению с модельной матрицей с энергоблоком $E_{1ij}^{\text{мод}}$ изменилась бы в D_{ij} раз. Данная таблица была получена на основе расчетного спектра в пакете CORSIKA по формулам из работ [12] и [13]. Толщина вещества X , с учетом минимальных ионизационных потерь мюонов $2 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$ оценивалась следующим образом:

$$X [\text{г} \cdot \text{см}^{-2}] = \frac{(E_{1ij}^{\text{мод}} - E_{ij}^{\text{мод}}) [\text{МэВ}]}{2 [\text{МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2]} \quad (9)$$

В результате моделирования и обработки модельных данных получились распределения числа треков, попавших в ячейки матриц-мюонограмм, расположенных на различных расстояниях от ГМГ. После нормировки на угловое распределение мюонов и пересчета величины подавления интенсивности мюонов с учетом их потерь в данных направлениях, формировалась модельная мюонограмма $M_T^{\text{мод}}$ в значениях толщин вещества в $\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$ по ячейкам.

Для отработки выявления областей динамических изменений в энергоблоке моделировались два случая. Сначала проводилось моделирование штатного состояния энергоблока с наличием всех объектов в структуре энергоблока и на основе данных получались соответствующие базовые матрицы $M_1^{\text{мод}}$ числа треков, которые затем пересчитывались в матрицы толщин $M_T^{\text{мод}}$ с учетом энергетического спектра интенсивности мюонов. Далее проводилось моделирование с измененной структурой энергоблока: были удалены топливные элементы в одной секции бассейна выдержки, два циркуляционных насоса и блок защитных труб в реакторе, добавлена вода в бассейны и в реактор, а также изменена усредненная плотность вещества

турбогенератора. По результатам обработки данных были получены соответствующие матрицы $M_2^{\text{МОД}}$ и $M_{T2}^{\text{МОД}}$, которые были названы динамическими.

Модельные мюнограммы $M_1^{\text{МОД}}$ и $M_{T1}^{\text{МОД}}$ с ячейками 0.4×0.4 м² на расстоянии 62 м от центра ГМГ, полученные для штатного состояния энергоблока, показаны на Рис. 10. На данных матрицах отчетливо проявляются элементы реакторной установки и бетонных стен. В нижней части мюнограммы хорошо видна проекция турбогенератора.

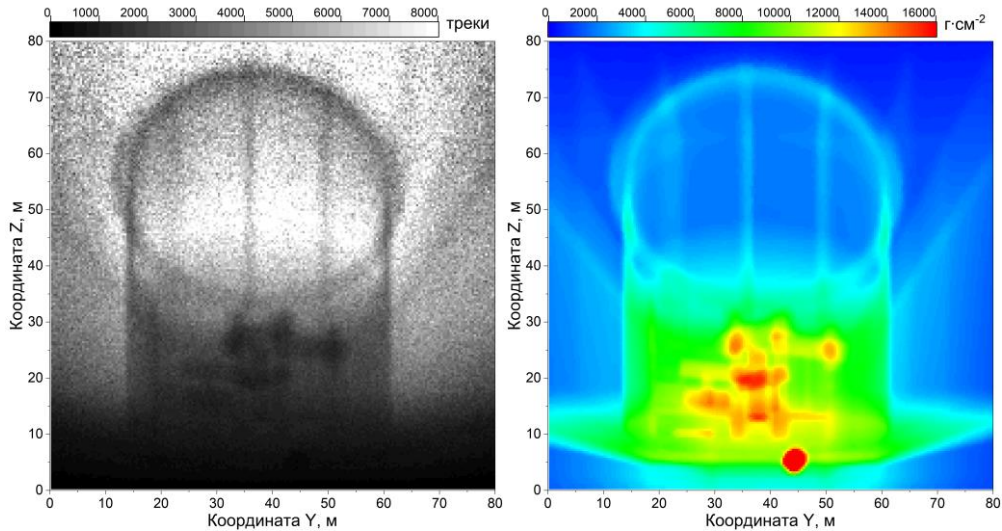


Рис. 10. Модельная матрица распределения числа треков $M_1^{\text{МОД}}$ (слева) и толщин вещества $M_{T1}^{\text{МОД}}$ (справа) на расстоянии 62 м от центра ГМГ [11].

В результате вычитания матрицы $M_2^{\text{МОД}}$ из $M_1^{\text{МОД}}$ при соответствующей нормировке на статистику d получается разностная матрица $M_3^{\text{МОД}}$:

$$M_3^{\text{МОД}} = \frac{M_2^{\text{МОД}} - M_1^{\text{МОД}} \cdot d}{\sqrt{M_1^{\text{МОД}} \cdot d}}, \quad (10)$$

$$d = \frac{\sum_{i,j} (M_2^{\text{МОД}}[i,j])}{\sum_{i,j} (M_1^{\text{МОД}}[i,j])} \quad (11)$$

Для более четкого проявления отклонений при вычитании матриц дополнительно применялся гауссов фильтр низких частот. В случае вычитания матриц толщин используется прямое вычитание одной матрицы из другой с предварительным применением к каждой медианного фильтра:

$$M_{T3}^{\text{МОД}} = M_{T2}^{\text{МОД}} - M_{T1}^{\text{МОД}} \quad (12)$$

Пример разностных матриц для точки 62 м от центра детектора представлен на Рис. 11. Матрица $M_3^{\text{МОД}}$ отображает основные различия между штатным $M_1^{\text{МОД}}$ и динамическим $M_2^{\text{МОД}}$ состоянием. Из рисунков видно, что разностная матрица $M_{T3}^{\text{МОД}}$ по толщинам более информативна, чем матрица по числу треков $M_3^{\text{МОД}}$. Эти изображения предоставляют качественную оценку метода реконструкции, которую можно сравнить с экспериментальными

данными. В разностной матрице числа треков синий цвет указывает на дефицит частиц, а красный – на избыток. Разностная матрица распределения толщин является инверсной по отношению к матрице распределения плотности точек пресечения треков с референтной плоскостью: синий цвет обозначает уменьшение толщин слоев поглощения мюонов в пределах телесных углов, выделяемых ячейками, а красный – увеличение.

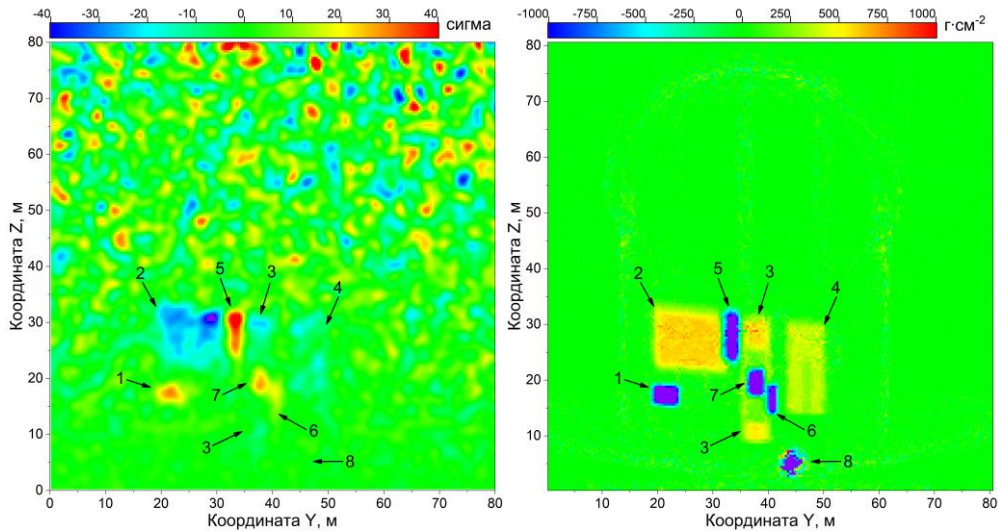


Рис. 11. Модельная разностная матрица числа треков $M_3^{\text{МОД}}$ (слева) и толщин вещества $M_{T3}^{\text{МОД}}$ (справа) на расстоянии 62 м от центра детектора: 1 – уран в бассейне выдержки; 2, 3, 4 – вода в бассейнах и реакторе; 5, 6 – циркуляционные насосы; 7 – блок защитных труб; 8 – турбогенератор [11].

Моделированные данные также позволили оценить точностные характеристики детекторов и методов реконструкции. Для этого сравнивались смоделированные треки с известной траекторией и результаты реконструкции этих треков в геометрии детектора. Далее находилась разница этих значений для вертикальной координаты $\Delta Z = Z^{\text{рек}} - Z^{\text{МОД}}$ и зенитных углов $\Delta\theta = \theta^{\text{рек}} - \theta^{\text{МОД}}$.

На Рис. 12 представлены распределения для набора из 10^4 реконструированных событий, полученные для ССД. Погрешность определения точки на треке по полученным данным составила около 9 мм (FWHM), а верхняя оценка угловой погрешности составила $\sigma \approx 0.23^\circ$, что соответствует ошибке определения трека в пространстве $\sigma_\psi = \sqrt{2} \cdot \sigma \approx 0.33^\circ$ (около 6 мрад).

В случае с ДДТ (Рис. 13) точность определения точки на треке имеет величину около 2 мм (FWHM), а верхняя погрешность определения угла составила около $\sigma \approx 0.04^\circ$, что соответствует ошибке определения трека в пространстве $\sigma_\psi = \sqrt{2} \cdot \sigma \approx 0.06^\circ$ (~1 мрад). Эта точность позволяет при достаточной статистике локализовать объект площадью 20×20 см² на расстоянии до 50 м.

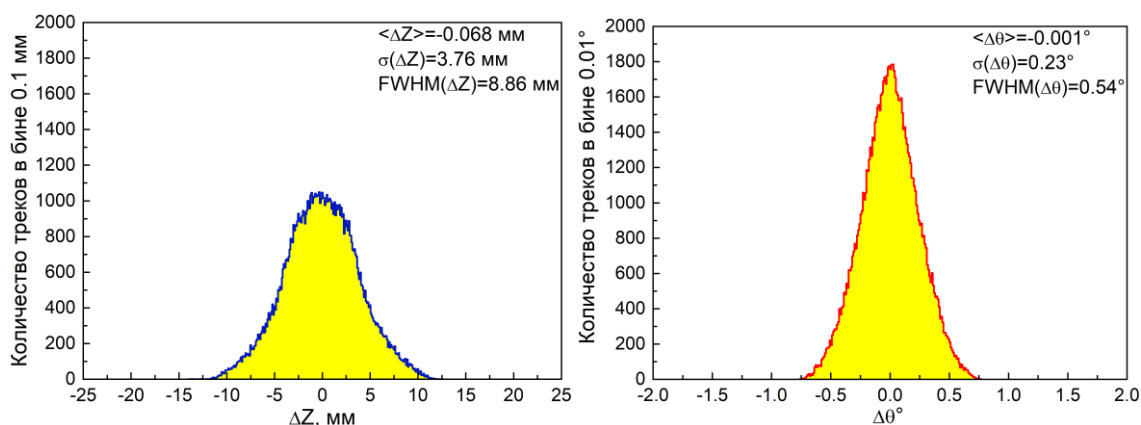


Рис. 12. Оценка пространственной (слева) и угловой (справа) точности ССД.

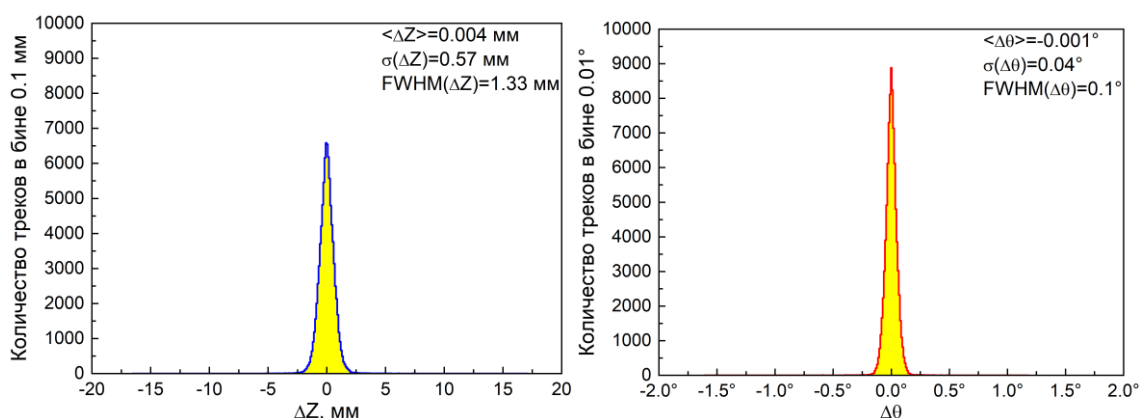


Рис. 13. Оценка пространственной (слева) и угловой (справа) точности ДДТ.

После проведения тестовых измерений в НИЯУ МИФИ, ГМГ в полной конфигурации был доставлен на Калининскую АЭС (г. Удомля) для дальнейших испытаний с целью проверки работоспособности в реальных условиях, отработки методики мюнографии крупномасштабных объектов и сопоставления с результатами моделирования. Эксперименты по мюнографии энергоблока АЭС проводились с октября 2022 по ноябрь 2022 г. и с конца апреля 2023 по ноябрь 2023 г.

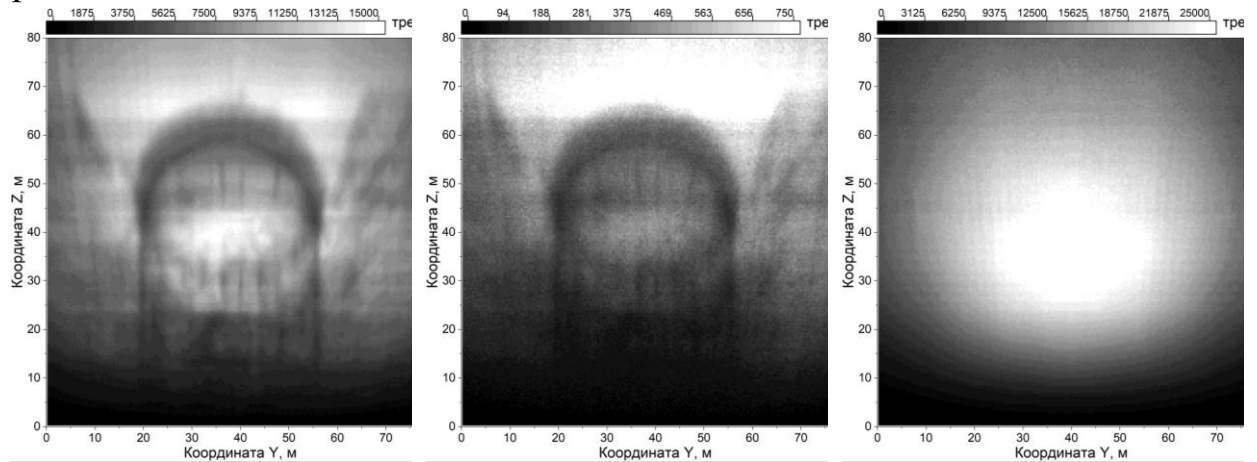
Первая серия измерений, проведенная в период с октября по ноябрь 2022 года, была пробной. За это время был полностью собран ГМГ и размещен на предварительно подготовленной площадке, расположенной между энергоблоком №4 и спецкорпусом (Рис. 14), внутри испытательного стенда, помещенного внутри пневмокаркасного ангара. Первые измерения были нацелены на наблюдение за реакторным блоком в штатных условиях работы, проверку работоспособности системы ГМГ и отработки методики реконструкции и получения мюнограмм.

Вторая серия измерений [11], проходившая с апреля по ноябрь 2023 года, была нацелена на проверку разностного метода получения мюнограмм и обнаружение динамических изменений во время летних планово-предупредительных ремонтных работ (ППР) на энергоблоке №4.



Рис. 14. Размещение стенда ГМГ.

В каждом эксперименте были построены соответствующие матрицы-мюнограммы. Их построение проводилось на референтной плоскости, «расположенной» на расстояниях от 50 до 70 м от нулевой точки лабораторной системы координат с шагом 2 м, размер матрицы 80×80 м с ячейкой 0.4×0.4 м. На Рис. 15 показаны суммарные экспериментальные матрицы ДДТ на расстоянии 50 м от нулевой точки. Различная плотность точек в поле матрицы соответствует пространственно-угловому распределению восстановленных треков мюонов.



а) по всем событиям б) по триггеру ССД в) модель

Рис. 15. Матрицы числа треков ДДТ ГМГ в точке 50 м.

Модельная матрица используется для нормировки экспериментальных данных с целью устранения сильной степенной зависимости потока мюонов от зенитного угла. Это дает возможность более детально выделить зоны анизотропии для больших зенитных углов. На Рис. 16 представлены матрицы-мюнограммы, полученные по данным ДДТ без триггера и с триггером от ССД с учетом статистики зарегистрированных мюонов с нормировкой на модельный спектр. На Рис. 17 приведены соответствующие матрицы толщин вещества по ячейкам матрицы.

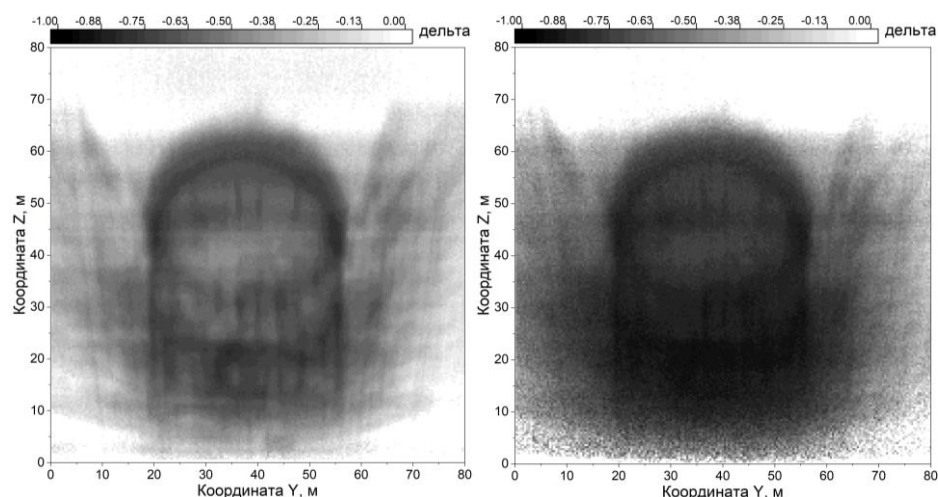


Рис. 16. Матрица отклонений ДДТ ГМГ: слева – без триггера, справа – с триггером.

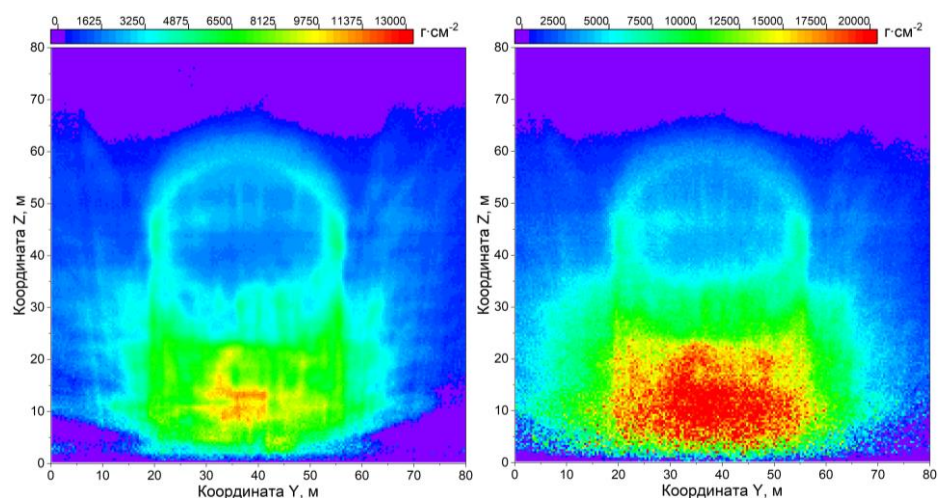


Рис. 17. Матрица толщин ДДТ ГМГ: слева – без триггера, справа – с триггером.

При сопоставлении Рис. 16 и Рис. 15(а) видно, что нормированная матрица более детально отображает особенности структуры комплекса энергоблока. Вертикальные полосы в центре изображения и «крылья» в областях от 0 до 20 м и от 60 до 80 м по координате Y соответствуют бетонным стенкам и перекрытиям вспомогательных помещений обстройки реакторного отделения. Реакторная зона располагается на высоте от 15 до 35 метров, а ниже 15 метров проецируются подреакторные помещения, оборудование и комплекс турбин машинного зала. Также из рисунков следует, что из-за низкой эффективности ССД, статистика по триггерным событиям оказалась достаточно низкой.

Изображение, получаемое ГМГ при наблюдении объекта под определенным углом к горизонту, подвергается перспективной трансформации из-за построения матриц по трекам, реконструированным в проекционных углах φ и θ детектора, с последующим проецированием в обратном направлении на 2D референтную плоскость.

На основе анализа полученных мюнограмм была оценена толщина вертикального участка стены гермооболочки. На Рис. 18 представлена мюнограмма с гистограммами по горизонтальному разрезу на высоте 32 м, где отсутствуют крупные объекты, которые могли бы исказить результаты измерений. Шаг гистограммы составил 20 см. Измерения показали, что толщина стенки составляет 120 ± 20 см, что совпадает с реальной толщиной. Внешний край стенки измерен с пространственной точностью не хуже 10 см, что соответствует угловому разрешению 1.5 мрад. Эти результаты хорошо согласуются с данными измерений на прототипе ГМГ в МИФИ.

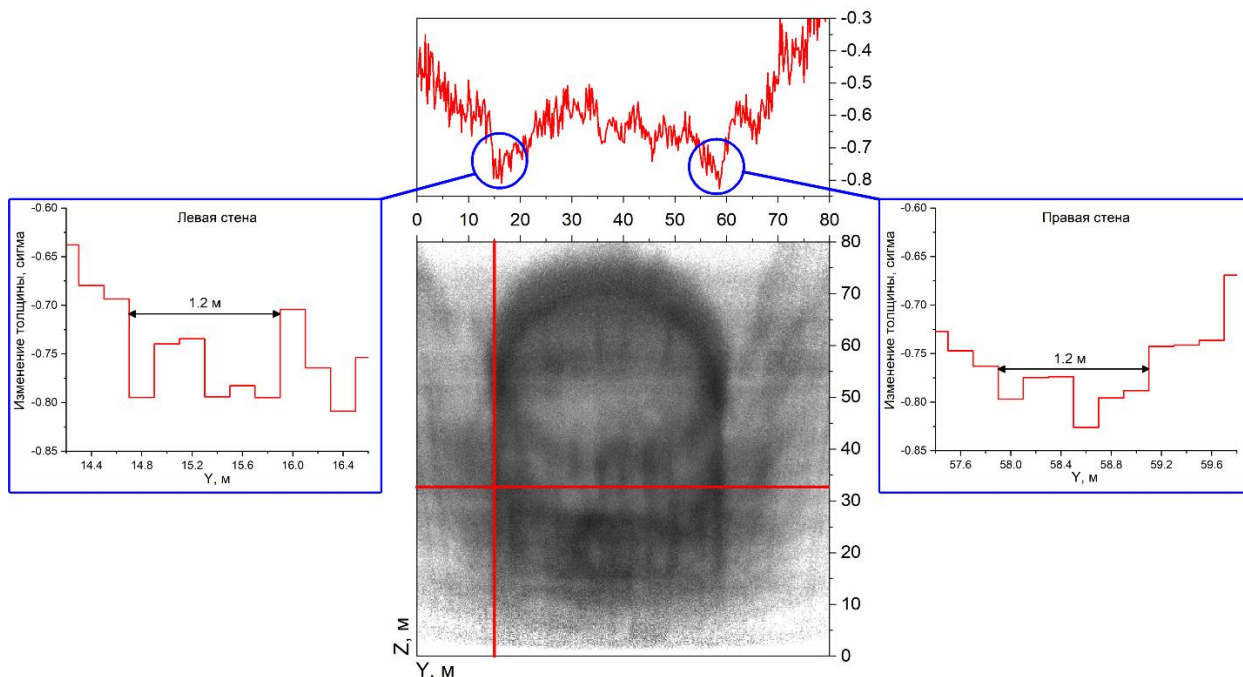
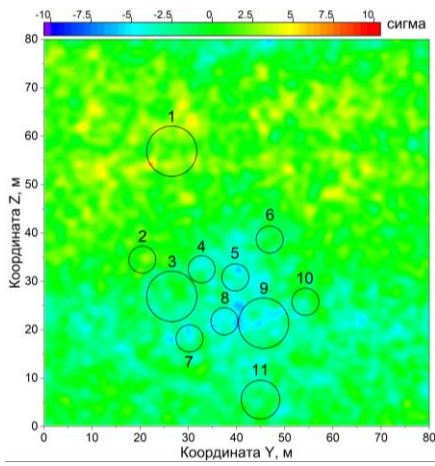


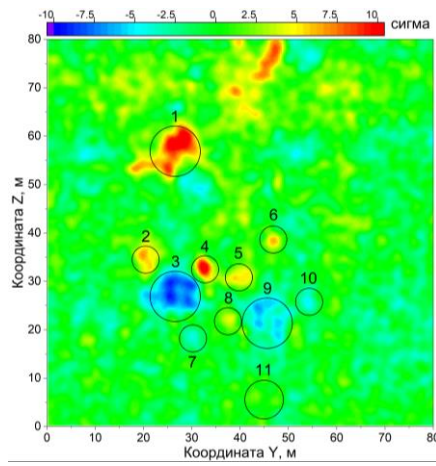
Рис. 18. Измерение толщины стен гермооболочки.

В 2023 году была осуществлена мюнография энергоблока в период штатной работы и в период ППР. После второй экспериментальной серии измерений данные были разделены на несколько периодов: штатная работа реактора осенью 2022 года, весной и летом 2023 года, а также перегрузка и выгрузка топлива во время ППР летом 2023 года. Для каждого из этих периодов были получены матрицы по плотности треков частиц в ячейках.

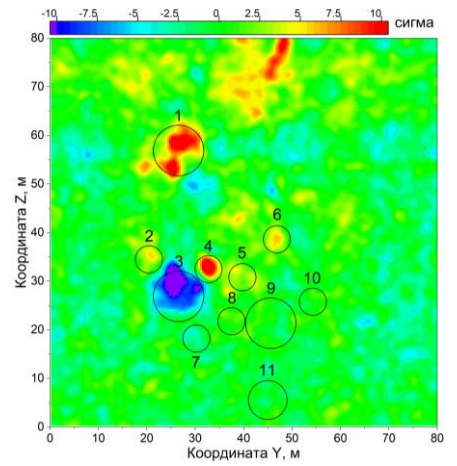
Для выявления изменений в реакторной зоне во время ремонтных работ были построены разностные матрицы по плотности точек и толщинам, представленные на Рис. 19 и Рис. 20. Эти матрицы сформированы путем вычитания из матриц, полученных в периоды перегрузки и выгрузки топлива, матрицы, полученной в период штатной работы реактора. В качестве контрольной матрицы, подтверждающей надежность работы мюонного годоскопа, была построена матрица, показывающая разницу между периодами штатной работы реактора: осенью 2022 года, весной 2023 года и летом 2023 года после ремонтных работ.



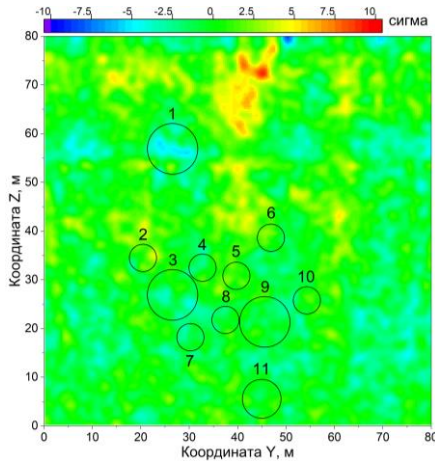
а) весна 2023 минус осень 2022



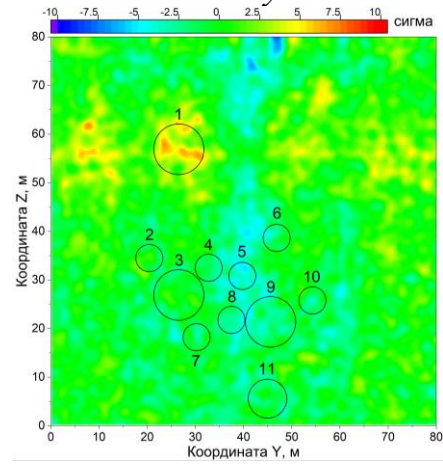
б) перегрузка топлива 2023 минус осень 2022



д) выгрузка топлива 2023 минус осень 2022

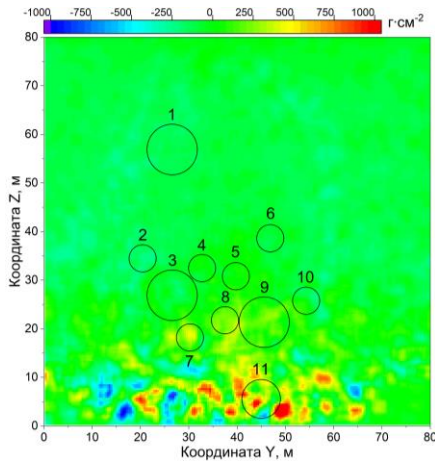


в) лето 2023 минус осень 2022

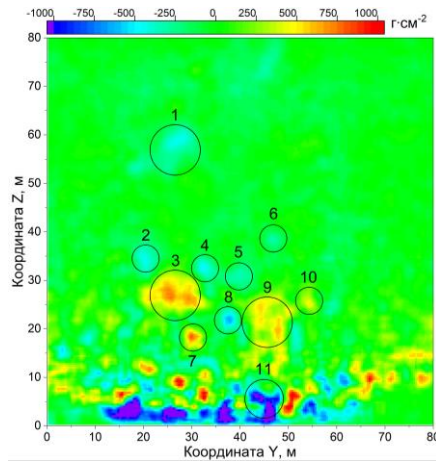


г) весна 2023 минус лето 2023

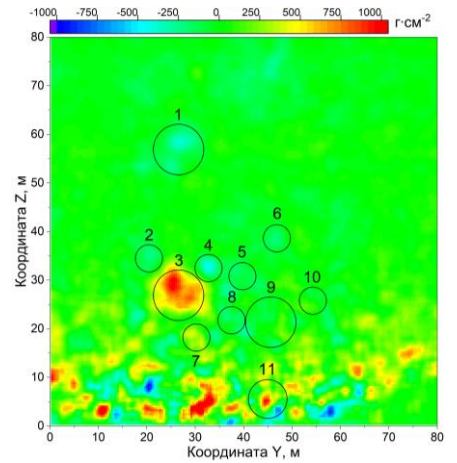
Рис. 19. Разностные матрицы по числу треков ДДТ ГМГ [11].



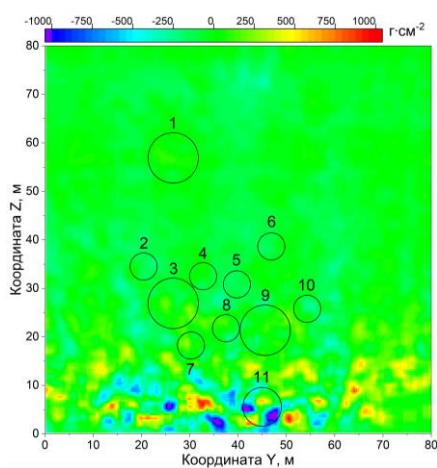
а) весна 2023 минус осень 2022



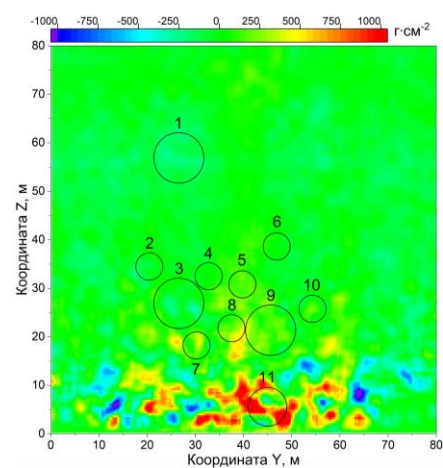
б) перегрузка топлива 2023 минус осень 2022



д) выгрузка топлива 2023 минус осень 2022



в) лето 2023 минус осень 2022



г) весна 2023 минус лето 2023

Рис. 20. Разностные матрицы толщин по данным ДДТ ГМГ [11].

В отличие от базовых матриц во время штатной работы, на матрицах, полученных в течение различных этапов ППР, были выявлены 11 областей с изменениями. В разностной матрице по числу треков области синего цвета указывают на недостаток событий в угловом распределении мюонов, а области красного цвета – на избыток, связанный с перемещением различной материалов и оборудования внутри реакторного блока. Избыток в нижней части мюонограмм на Рис. 20 вызван расхождением экспериментального и используемого модельного спектра частиц при зенитных углах больше 85 градусов (окологоризонтальные события). Отдельные артефакты в поле матриц под большими зенитными углами могут быть вызваны статистической погрешностью.

Выделенные области были идентифицированы в результате сопоставления с графиком и перечнем проведенных ремонтных работ и структурой энергоблока, показанной на Рис. 21. Во время ППР были выполнены следующие работы:

- извлечение крышки реактора (обл. 8 на Рис. 21) с помощью мостового крана (обл. 1 и 6) и её установка в специальную шахту (обл. 10);
- извлечение блока защитных труб (обл. 8) и его установка в бассейн перегрузки (обл. 9);
- перегрузка топлива из реактора (обл. 8) в бассейн выдержки (обл. 3), а затем из бассейна выдержки в транспортный контейнер (обл. 2);
- извлечение главных циркуляционных насосов (обл. 4 и 5);
- частичный разбор турбогенератора (обл. 11) с использованием крана машинного зала (обл. 7).

Все перемещения оборудования вблизи реактора осуществлялись с заполнением бассейнов и шахты реактора водой.

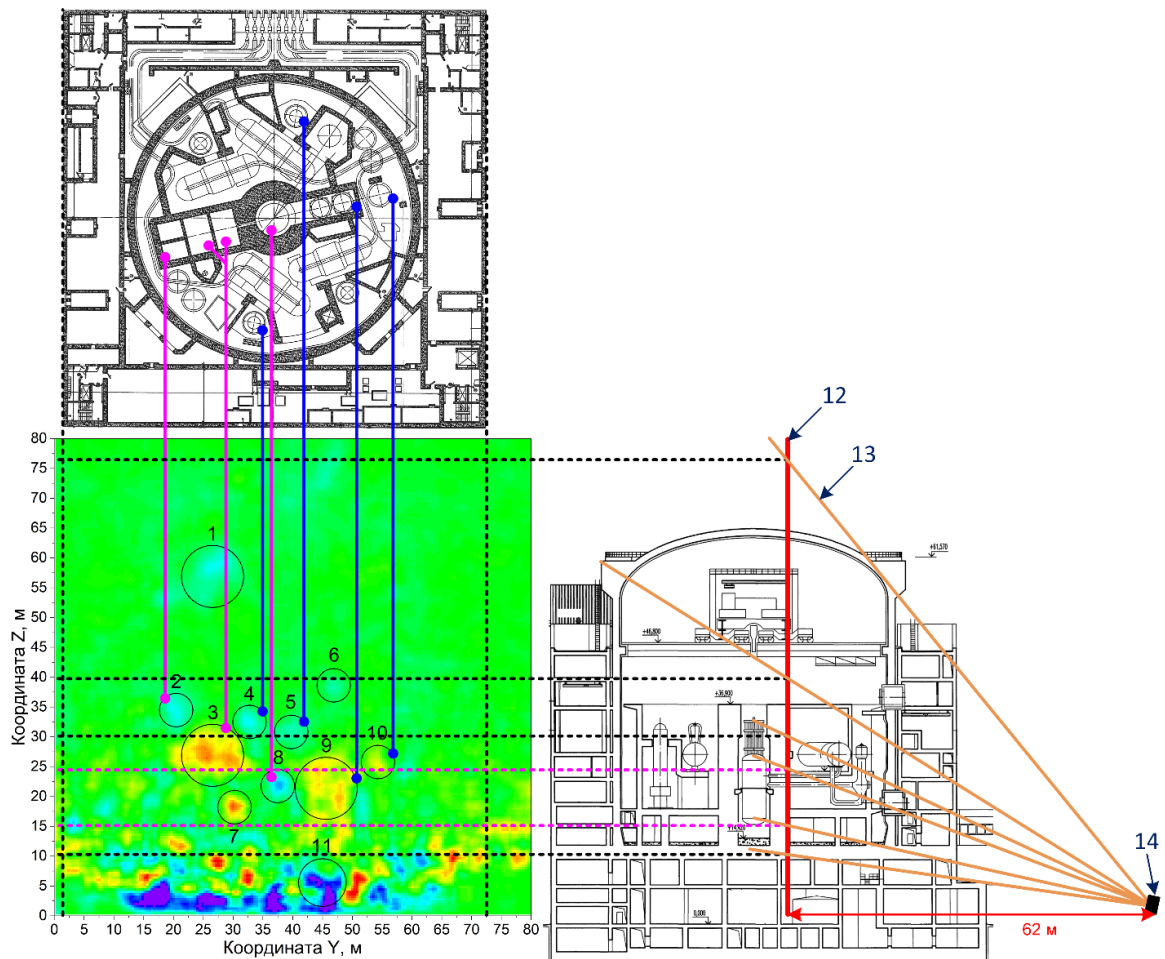


Рис. 21. Сопоставление разностной мюнограммы со схемой энергоблока: 1 и 6 – кран; 2 – транспортный контейнер; 3 – бассейн выдержки; 4 и 5 – главные циркуляционные насосы №2 и №4; 7 – кран машинного зала; 8 – блок защитных труб; 9 – бассейн перегрузки; 10 – крышка реактора; 11 – турбина машинного зала; 12 – референтная плоскость; 13 – выделенные направления треков частиц; 14 – детектор [11].

Для оценки скорости обнаружения изменений были построены матрицы за 24 часа наблюдения в точке 62 м. Их анализ показал, что времени набора этих данных достаточно для обнаружения изменений в объектах, при этом более масштабные структуры могут быть обнаружены за меньшее время. На Рис. 22 в качестве примера показаны однодневные матрицы в конце ППР. Видно, как по мере уменьшения количества перемещений объектов в области бассейна выдержки количество областей с динамическими изменениями уменьшается.

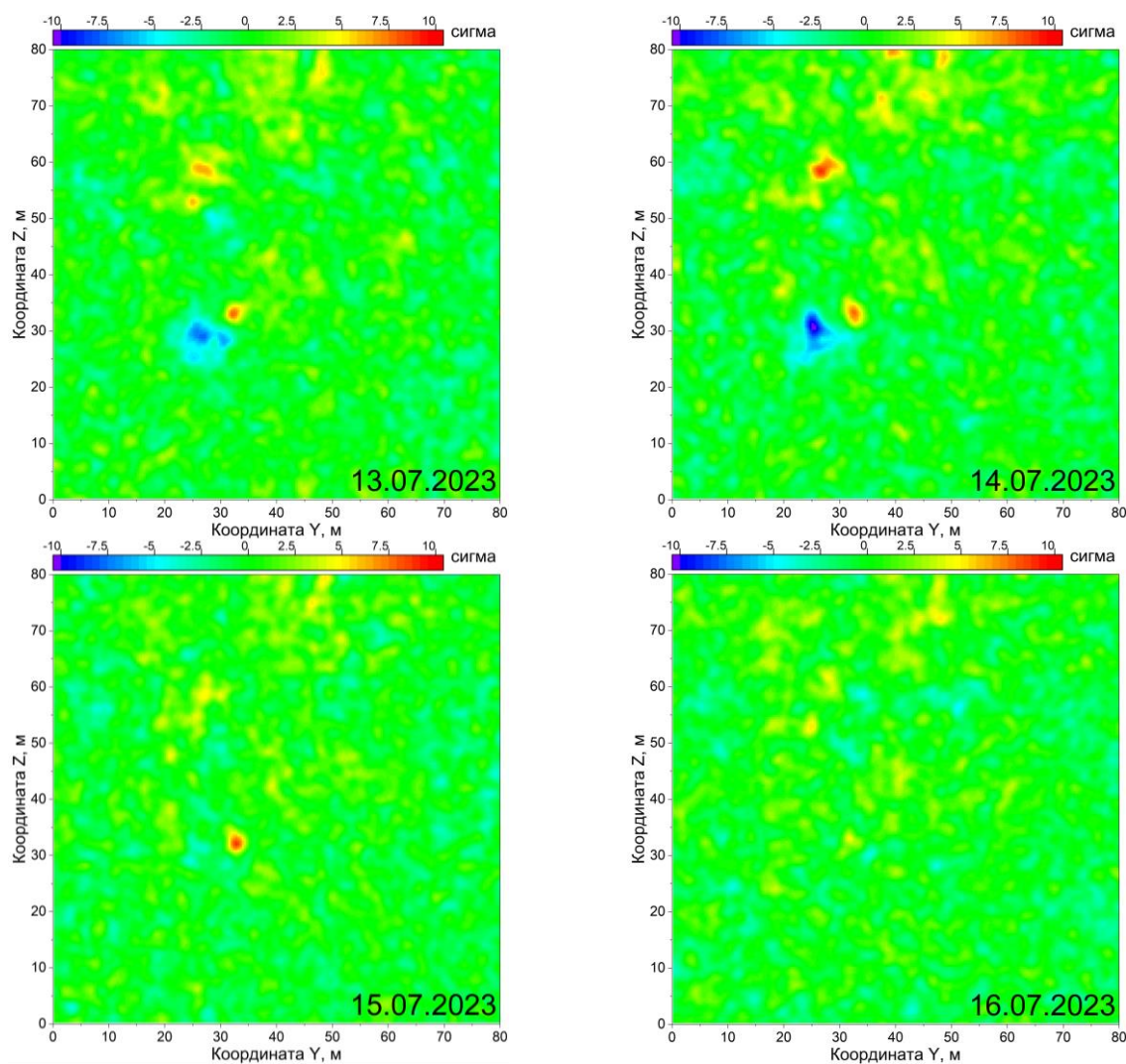


Рис. 22. Суточные разностные матрица по числу треков [11].

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1) Впервые разработана, создана и протестирована гибридная многоканальная регистрирующая система широкоапертурного мюонного годоскопа, включающая детектор на дрейфовых трубках и детектор на сцинтилляционных стрипах. Использование двух независимых детектирующих систем позволило с одной стороны сравнить два наиболее популярных метода формирования мюонных детекторов для мюонографии объектов, с другой стороны повысить надежность и достоверность получаемых мюонограмм.

2) Разработан, создан и протестирован автоматизированный программно-аппаратный комплекс, включающий средства сбора, обработки, хранения и визуализации информации в режиме реального времени.

3) Разработаны и реализованы методы реконструкции трековых событий по данным широкоапертурного гибридного мюонного годоскопа и формирования на их основе мюонограмм.

4) Впервые проведены экспериментальные исследования разработанных методов и систем с оценкой их точностных характеристик с использованием тестовых объектов. Было показано, что угловая точность локализации свинцовых объектов с размерами $40 \times 40 \times 40$ см³, расположенных на расстоянии 40 м и на высоте около 20 м, составила около 2 мрад. На созданный детектор был получен сертификат на средство измерения.

5) Проведено моделирование метода мюнографии крупномасштабного объекта на примере энергоблока АЭС с ВВЭР-1000. Моделированные мюнограммы энергоблока были использованы для лучшего понимания особенностей полученных экспериментальных 2D мюнограмм.

6) Впервые проведены экспериментальные исследования структуры всего энергоблока АЭС методом мюнографии в периоды штатной работы и во время планово-предупредительных ремонтных работ. В результате анализа полученных мюнограмм была отработана методика выделения структурных особенностей такого масштабного объекта, как энергоблок.

7) Впервые был разработан и реализован подход к анализу динамических изменений в структуре объектов. Метод был применен во время ремонтных работ на энергоблоке АЭС. Впервые было продемонстрировано, что с помощью разработанной аппаратуры изменения в структуре реакторного блока достоверно локализуются в течение экспозиции длительностью до 24 часов.

8) В течение экспериментальных серий были подтверждены точностные характеристики годоскопа. При измерении толщины стен гермооболочки (120 см бетона) была продемонстрирована точность ± 20 см. Тем не менее, большие толщины бетона (до 12 м) затрудняют детализацию объектов реакторной зоны на их фоне из-за многократного кулоновского рассеяния. Для лучшей детализации необходимо применять 3D мюнографию.

9) Детектор на дрейфовых трубках проявил себя более надежным и устойчивым к резким изменениям метеоусловий прибором, чем детектор на сцинтилляционных стрипах. Однако жесткий график проведения испытаний годоскопа и экспериментальных исследований на Калининской АЭС не позволил в полной мере настроить регистрирующую систему ССД и получить сопоставимые по качеству с ДДТ экспериментальные данные. Тем не менее, использование гибридной детектирующей системы в полной мере сделало возможным успешное достижение целей диссертационной работы.

В рамках данной работы был создан гибридный мюонный годоскоп, объединяющий сцинтилляционный и дрейфовый детекторы и разработан метод дистанционной 2D мюнографии для исследования крупномасштабных

объектов. Полученные результаты могут быть применены для развития технологии дистанционного контроля состояний конструкций различных крупномасштабных критических инфраструктур и создания соответствующей аппаратуры для этих целей.

Список цитируемой литературы

1. *Shukla P. and Sankrith S.* Energy and angular distributions of atmospheric muons at the Earth // *Int. J. Mod. Phys. A.* 2018. V. 33. No. 30. 1850175. DOI: 10.1142/S0217751X18501750.
2. *Grieder P.K.F.* Cosmic rays at earth: researcher's reference manual and data book / Grieder P.K.F. – Elsevier, 2001. P. 432.
3. *Zyla P.A. et al.* // *Progress Theoretical and Experimental Physics. Particle Data Group.* 2020. 083C01. P. 511, P. 512, P. 546. DOI: 10.1093/ptep/ptaa104.
4. *Барбашина Н.С., Борог В.В., Кокоулин Р.П. и др.* Способ и устройство для получения мюнографий. Патент RU2406919C2 от 20.12.2010 на сайте Федерального института промышленной собственности, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/4e/6d/b5/12929dad5e5150/RU2406919C2.pdf> (дата обращения 04.11.2024).
5. *Гонсалес Р., Вуде Р., Эддинс С.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. С. 329.
6. *Yashin I.I., Davidenko N.N., Dovgopoly A.O. et al.* Muon Tomography of Large-Scale Objects // *Physics of Atomic Nuclei.* 2021. V. 84. P. 1171. DOI: 10.1134/S1063778821130421.
7. *Астапов И.И., Каверзнев М.М., Конев Ю.Н. и др.* Патент RU2761333C1 от 07.12.2021 на сайте Федерального института промышленной собственности, URL: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/761/333/%D0%98%D0%97-02761333-00001/document.pdf> (дата обращения 04.11.2024).
8. *Madsen K., Nielsen H.B., Tingleff O.* Methods for non-linear least squares problems // IMM, DTU. Lyngby, 2004.
9. *Божко Н.И., Борисов А.А., Кожин А.С., Фахрутдинов Р.М.* Опыт работы с дрейфовыми камерами без постоянного обновления рабочей газовой смеси: Препринт ИФВЭ 2019–14. – Протвино, 2019. – 57 с.
10. *Терегулов, А. И.* Стенд для тестирования сцинтилляционных стрипов // Труды 10-й БМШ ЭТФ-2009. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. Т. 2. С. 277.
11. *Pasyuk N.A., Alyev R.R., Davidenko N.N. et al.* Diagnostics of the structure of a nuclear power plant unit using muonography. Preprint, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.34692.13440>.

12. *Chen J., Li H., Li Y., Liu P.* Towards a muon scattering tomography system for both low-Z and high-Z materials // JINST. 2023. V. 18. P08008. DOI: 10.1088/1748-0221/18/08/P08008.
13. *Guan M., Chu M.C., Cao J. et al.* A parametrization of the cosmic-ray muon flux at sea-level, arXiv:1509.06176 (2015). DOI: 10.48550/arXiv.1509.06176.

Основные публикации по теме диссертации

1) *Пасюк Н.А., Алыев Р.Р., Давиденко Н.Н., Киселев С.М., Кожин А.С., Компаниец К.Г., Конев Ю.Н., Олейник С.В., Петрухин А.А., Фахрутдинов Р.М., Целиненко М.Ю., Шутенко В.В., Яшин И.И.* Мюнография структуры энергоблока Калининской АЭС // ЖТФ. 2025. Т. 95. № 1. С. 179–187. DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59477.251-24 (**WoS, Scopus; K1**);

2) *Pasyuk N.A., Kompaniets K.G., Petrukhin A.A., Tselinenko M.Yu., Shutenko V.V., Yashin I.I.* Scintillation strip detector of a hybrid hodoscope for muon tomography of large-scale objects // Instrum. Exp. Tech. 2024. V. 67. No. 4. P. 672–681. DOI: 10.1134/S0020441224701069 (**WoS, Scopus; Q4**).

3) *Пасюк Н.А., Давиденко Н.Н., Кожин А.С., Компаниец К.Г., Конев Ю.Н., Олейник С.В., Петрухин А.А., Фахрутдинов Р.М., Целиненко М.Ю., Шудра Д.В., Шутенко В.В., Яшин И.И.* Прототип гибридного мюонного годоскопа для мюнографии крупномасштабных объектов // ЖТФ. 2024. Т. 94. № 8. С. 1398–1409. DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58569.40-24 (**WoS, Scopus; K1**);

(англоязычная версия: *Pasyuk N.A., Davidenko N.N., Kozhin A.S., Kompaniets K.G., Konev Yu.N., Oleinik S.V., Petrukhin A.A., Fakhrutdinov R.M., Tselinenko M.Yu., Shudra D.V., Shutenko V.V., Yashin I.I.* Prototype of a hybrid muon tomograph for muonography of large-scale objects // Tech. Phys. 2024. V. 69. No. 8. P. 1296–1306. DOI: 10.61011/TP.2024.08.59019.40-24 (**WoS, Scopus; Q3**)).

4) *Пасюк Н.А., Борисов А.А., Компаниец К.Г., Кожин А.С., Фахрутдинов Р.М., Целиненко М.Ю., Шутенко В.В., Яшин И.И.* Детектор на дрейфовых трубках гибридного годоскопа для мюонной томографии крупномасштабных объектов // Приборы и техника эксперимента. 2024. №2. С. 29–38. DOI: 10.31857/S0032816224020044 (**WoS, Scopus; K1**)).

(англоязычная версия: *Pasyuk N.A., Borisov A.A., Kompaniets K.G., Kozhin A.S., Fakhrutdinov R.M., Tselinenko M.Yu., Shutenko V.V., Yashin I.I.* Drift tube detector of a hybrid hodoscope for muon tomography of large-scale objects // Instrum. Exp. Tech. 2024. V. 67. No. 2. P. 219–227. DOI: 10.1134/S0020441224700489 (**WoS, Scopus; Q4**)).

5) Яшин И.И., Киндин В.В., Компаниец К.Г., Пасюк Н.А., Целиненко М.Ю. Тестирование элементов мюонного томографа на сцинтилляционных стрипах с оптоволоконным светосбором // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 4. С. 598–600. DOI: 10.31857/S0367676521040396 (**Scopus; K1**);

(англоязычная версия: *Yashin I.I., Kindin V.V., Kompaniets K.G., Pasyuk N.N., Tselinenko M.Yu.* Tests of Elements of the Muon Hodoscope Based on Scintillation Strips with Fiber Light Collection // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. V. 85. No. 4. P. 458–460. DOI: 10.3103/S1062873821040389 (**Scopus; Q3**)).

6) *Yashin I.I., Davidenko N.N., Dovgopoly A.O., Fakhroutdinov R.M., Kaverznev M.M., Kompaniets K.G., Konev Yu.N., Kozhin A.S., Paramoshkina E.N., Pasyuk N.A., Tselinenko M.Yu., Yuschenko O.P., Zolotareva O.V.* Muon Tomography of Large-Scale Objects // Physics of Atomic Nuclei. 2021. V. 84. No. 6. P. 1171–1181. DOI: 10.1134/S1063778821130421 (**WoS, Scopus; Q4**).

7) Астапов И.И., Пасюк Н.А., Хохлов С.С., Целиненко М.Ю., Яшин И.И. // Комплекс для измерения световых сцинтилляционных стрипов // Патент на изобретение RU2794236C1 от 13.04.2023 г. Заявка №2022125444 от 29.09.2022.

8) Сертификат об утверждении типа средств измерений №87385-22 от 23 ноября 2022 г.

9) Пасюк Н.А., Кожин А.С., Компаниец К.Г., Фахрутдинов Р.М., Целиненко М.Ю., Шутенко В.В., Яшин И.И. // Программа MuonGraph 1.01 для управления, сбора и обработки данных гибридного мюонного томографа // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022663395 от 14 июля 2022 г.