

## ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРЫ РАБОТАЮЩЕГО ЭНЕРГОБЛОКА АЭС МЕТОДОМ МЮОНографии

© 2025 г. Н. А. Пасюк<sup>1),\*</sup>, Р. Р. Алыев<sup>2)</sup>, Н. Н. Давиденко<sup>3)</sup>,  
С. М. Киселев<sup>2)</sup>, А. С. Кожин<sup>1),4)</sup>, К. Г. Компаниец<sup>1)</sup>, Ю. Н. Конев<sup>3)</sup>,  
С. В. Олейник<sup>3)</sup>, А. А. Петрухин<sup>1)</sup>, Р. М. Фахрутдинов<sup>1),4)</sup>, М. Ю. Целиненко<sup>1)</sup>,  
В. В. Шутенко<sup>1)</sup>, И. И. Яшин<sup>1),\*\*</sup>

Поступила в редакцию 03.12.2024 г.; после доработки 15.01.2025 г.; принята к публикации 16.01.2025 г.

В НИЯУ МИФИ в 2022 г. был создан гибридный мюонный годоскоп с чувствительной площадью  $3 \times 3 \text{ м}^2$  для исследования внутренней структуры крупномасштабных объектов методом мюонографии. Детектирующая система гоноскопа имеет гибридную структуру и состоит из сцинтилляционного стрипового детектора и детектора на дрейфовых трубках, и предназначена для регистрации треков заряженных частиц. Метод мюонографии основывается на использовании мюонов космических лучей в качестве проникающего излучения для “просвечивания” (по аналогии с рентгенографией) крупномасштабных объектов. В 2022–2023 гг. были проведены экспериментальные исследования внутренней структуры энергоблока Калининской АЭС с использованием метода мюонографии. В работе представлены краткое описание конструкции гибридного мюонного гоноскопа и результаты эксперимента по диагностике структуры энергоблока данным методом, проведенного в условиях его плановых ремонтных работ. Целью эксперимента являлась отработка методики оперативного выявления изменений в структуре реакторного блока во время ремонтных работ.

**Ключевые слова:** мюоны космических лучей, детекторы частиц, мюонный гоноскоп, мюонография, мюонограмма, ядерный реактор

DOI: 10.31857/S0044002725020014, EDN: GLHKAP

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Мюонография является методом неразрушающего контроля, основанным на регистрации и анализе пространственно-углового распределения естественного потока мюонов, прошедших через исследуемый объект, с целью изучения и визуализации его внутренней структуры (по аналогии с рентгенографией). Мюоны, проходящие через плотные объекты, по-разному поглощаются и отклоняются в зависимости от распределения плотности и химического состава вещества. Измеряя угловые распределения количества мюонов после их прохождения через объект наблюдения, можно сформировать мюонограмму — изображение внутренней структуры. На этих изображениях области

с различной плотностью или составом материалов можно идентифицировать по дефициту или избытку мюонов в различных областях углового распределения зарегистрированных мюонов.

По сравнению с традиционными методами дистанционной диагностики, такими как рентгеновское, нейтронное или ультразвуковое сканирование, мюонография обладает рядом преимуществ. Метод является неинвазивным, не требует физического доступа к объекту наблюдения и может быть реализован без использования дополнительных источников излучения.

Интерес к мюонографии в области исследования ядерных объектов значительно возрос после аварии на АЭС Фукусима–Даichi в 2011 г., когда потребовалось оценить состояние аварийных ядерных реакторов [1–3]. Мюонография оказалась единственным методом решения этой задачи, поскольку высокие уровни радиации исключали возможность сканирования внутренних объемов реактора традиционными методами.

На основе метода мюонографии с помощью небольших гоноскопов были сделаны попытки просвечивания участков других ядерных реакторов [4–7], в ходе которых были идентифицированы ак-

<sup>1)</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

<sup>2)</sup> Филиал АО “Концерн Росэнергоатом” “Калининская атомная станция”, Удомля, Россия.

<sup>3)</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций, Москва, Россия.

<sup>4)</sup> Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт” – ИФВЭ, Протвино, Россия.

\* E-mail: NAPasyuk@mephi.ru

\*\* E-mail: IIYashin@mephi.ru

тивная зона и элементы конструкции энергоблока. Мюонография также применяется для контроля изменений целостности и изотопного состава ядерных отходов внутри контейнеров хранения [8, 9]. В настоящее время использование мюонографии входит в сферу интересов МАГАТЭ, а ее методы включены в перечень инструментов для мониторинга работоспособности крупных объектов, включая атомные станции [10, 11].

С целью разработки методов мониторинга и неразрушающего контроля крупномасштабных объектов в реальном времени, в том числе энергоблоков АЭС, с применением метода мюонографии [12], в НОЦ НЕВОД (НИЯУ МИФИ) в сотрудничестве с АО «ВНИИАЭС» (Росатом) была разработана методика получения мюонограмм внутренней структуры ядерных энергоблоков, а также создан и протестирован мобильный гибридный мюонный годоскоп большой площади и апертуры для ее реализации [13–15].

В 2022 г. в НИЯУ МИФИ были проведены исследования точностных характеристик прототипа гибридного мюонного годоскопа (ГМГ) с помощью тестовых свинцовых блоков, расположенных на различных расстояниях и высотах [16]. Были проверены основные элементы системы и методики регистрации и оценены точностные характеристики: угловая точность составила около 2 мрад при локализации свинцовых блоков размером  $40 \times 40 \times 40$  см на расстоянии до 40 м.

Осенью 2022 г. на Калининской АЭС (г. Удомля) с использованием ГМГ был проведен эксперимент по мюонографии энергоблока с реактором ВВЭР-1000. Данный эксперимент, результаты которого представлены в работе [17], был направлен на проверку возможности применения разработанной конструкции для мюонографии энергоблока в условиях его штатной эксплуатации. Летом 2023 г. эксперимент был продолжен и заключался в выявлении изменений в структуре энергоблока во время планово-предупредительных ремонтных работ (ППР) с помощью разностного метода получения мюонограмм [16]. Обсуждение полученных результатов представлено в настоящей работе.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ ГИБРИДНОГО МЮОННОГО ГОДОСКОПА

Гибридный мюонный годоскоп [13] представляет собой модульную структуру, объединяющую две независимые регистрирующие системы: детектор на дрейфовых трубках (ДДТ) [14] и сцинтилляционный стриповый детектор (ССД) [15]. Обе системы имеют свои преимущества и при совместной работе дополняют друг друга. Сцинтилляционный детектор прост в эксплуатации, дает возможность организовать быстрый триггер (сигнал о прохождении через детектор заряженной частицы) и оперативно реконструировать треки мюонов. Детектор на дрейфовых трубках имеет большую чувствительную

площадь и обеспечивает одно из лучших координатных разрешений регистрации треков мюонов для крупномасштабных детекторов, уступающее только ядерным эмульсиям.

Годоскоп (рис. 1) состоит из 10 чередующихся ортогонально ориентированных однопроекционных координатных плоскостей с чувствительной площадью  $3 \times 3 \text{ м}^2$  каждая. Шесть плоскостей составляют сцинтилляционный детектор и четыре плоскости — детектор на дрейфовых трубках. Плоскости ДДТ состоят из трехслойных сборок 288 дрейфовых трубок длиной 3000 мм и диаметром 30 мм, разработанных и произведенных в НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ (г. Протвино). Плоскости ССД состоят из 128 длинных узких прямоугольных сцинтилляционных стрипов ( $3000 \times 23 \times 7$  мм) производства ООО «Унипласт» (г. Владимир) с оптоволоконным светосбором на кремниевые фотоумножители (SiPM Hamamatsu S13360-1350CS). Более подробное описание детекторов ГМГ и принципов их работы приведено в работах [14, 15], а методов реконструкции событий и построения мюонограмм в [16].

Основой конструкции ГМГ является несущая рама, состоящая из верхней, нижней и боковых обвязок, внутри которой размещены и зафиксированы координатные плоскости. Рама установлена на поворотной платформе, соединенной с мобильным модулем на двухосном шасси с выдвижными опорами. Такая конфигурация позволяет перемещать и ориентировать гоудоскоп относительно исследуемого объекта. Размеры всей конструкции в собранном виде составляют 4.5 м в высоту, 2.5 м в ширину, 6.2 м в длину, при весе около 4.5 т. Расстояние между крайними плоскостями составляет 1.8 м. Такие габариты детектора обеспечивают широкую апертуру, что позволяет изучать структуру крупных объектов, таких как энергоблок АЭС, за относительно короткое время экспозиции.

## 3. МЮОНГРАФИЯ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Эксперименты по мюонографии энергоблока АЭС проводились с октября 2022 по ноябрь 2022 г. и с конца апреля 2023 по ноябрь 2023 г. Суммарный объем данных за данный период составил порядка 900 млн треков одиночных частиц. ГМГ размещался на расстоянии около 70 м от центра реактора на площадке в пневмокаркасном модуле (рис. 2).

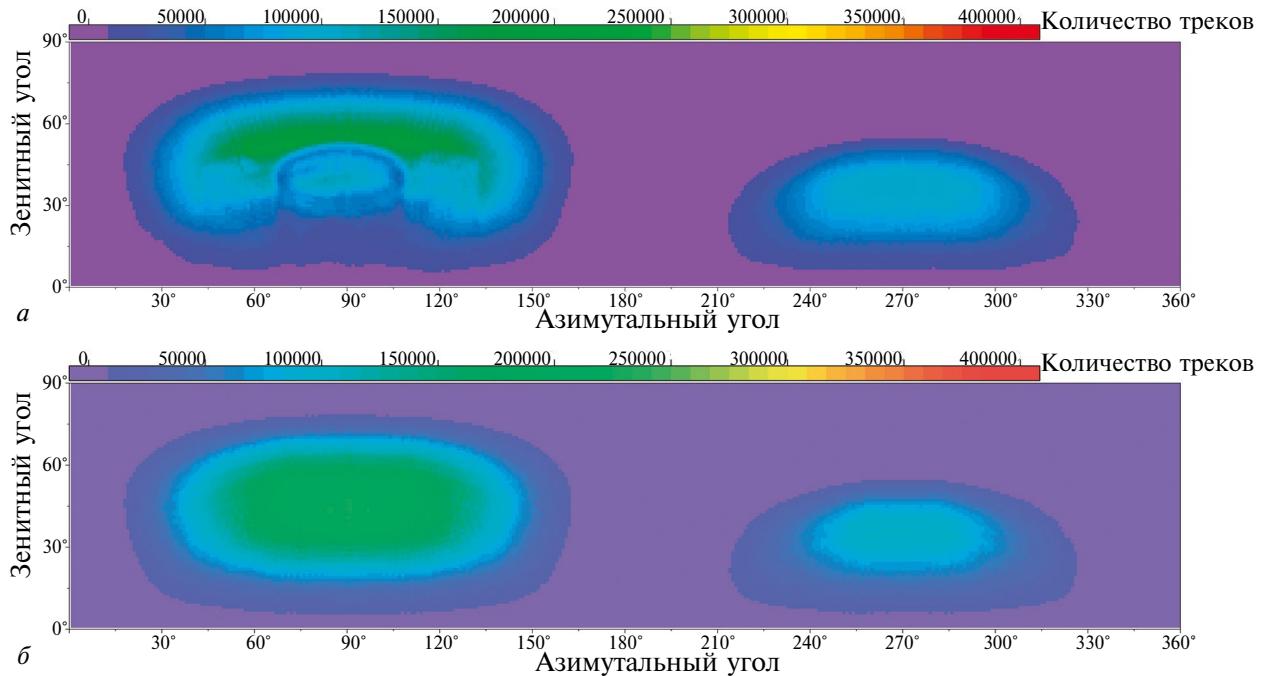
На основе зарегистрированных данных были получены матрицы зенитно-азимутальных распределений трековых событий, показанные на рис. 3а. Для сравнения на рис. 3б приведены модельные данные, полученные с использованием программного пакета CORSIKA в условиях отсутствия каких-либо объектов перед детектором. На матрицах распределение треков от 0 до 180 градусов по азимутальному углу соответствует прямому направлению на здание энергоблока, а от 180 до 360 градусов — обратному направлению



Рис. 1. Фотография гибридного мюонного годоскопа.



Рис. 2. Размещение ангара с ГМГ относительно энергоблока.



**Рис. 3.** Матрица зенитно-азимутального распределения реконструированных треков частиц: *а* – эксперимент; *б* – модель.

(с противоположной стороны детектора). Сравнение экспериментальных данных с модельными показывает, что в эксперименте, в отличие от модели, четко проявляются контуры энергоблока, что обусловлено поглощением частиц в его структуре. Угловая апертура детектора в прямом направлении составляет 80 градусов по зенитному углу и 160 градусов по азимутальному углу.

Модельный спектр представляет собой дифференциальные распределения интенсивности мюонов на поверхности Земли от первичных протонов с энергиями до 10 ТэВ для зенитных углов от 0 до 89 градусов. С помощью смоделированного углового спектра мюонов проводилась нормировка экспериментального спектра мюонов с целью устранения сильной степенной зависимости потока мюонов от зенитного угла [17]. Это дает возможность более детально выделить зоны анизотропии для больших зенитных углов.

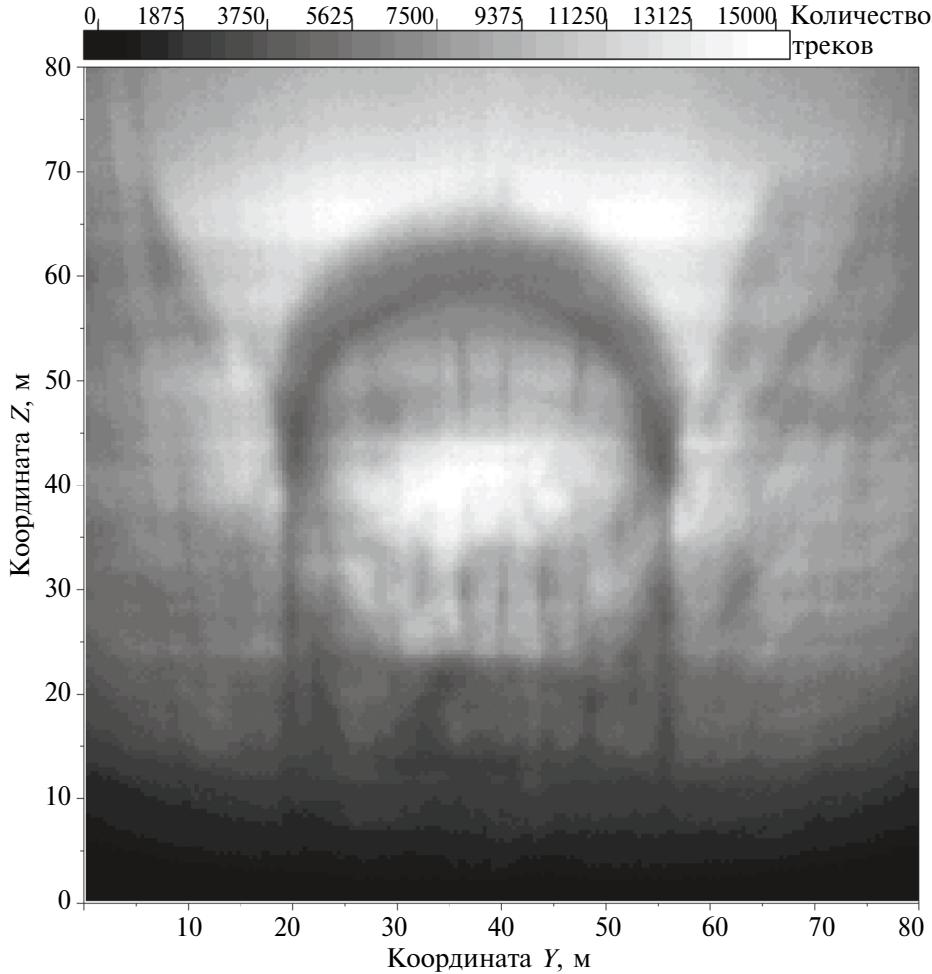
По экспериментальным данным были построены матрицы распределения точек пересечения реконструированных треков с условной референтной плоскостью, которая может задаваться на различных расстояниях от центра детектора, позволяя получать матрицы с различным углом обзора и областью наблюдения [16]. На рис. 4 представлена суммарная за 113 дней матрица распределения реконструированных треков на расстоянии 50 м от центра ГМГ. Матрица имеет размер  $80 \times 80$  м $^2$  с ячейками  $0.4 \times 0.4$  м $^2$ . Наблюдаемый дефицит точек (черный цвет) в некоторых областях связан с поглощением части мюонов более толстыми слоями вещества в данных направлениях. На изображе-

нии отчетливо видны гермооболочка и обстройка реакторного здания вокруг нее в виде “крыльев”. Особенности получаемых мюонограмм с учетом геометрии эксперимента были проанализированы на основе данных эксперимента 2022 г. на АЭС [17].

### 3.1. Моделирование мюонографии энергоблока АЭС

Для отработки метода мюонографии с целью оперативного обнаружения изменений в структуре энергоблока АЭС 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 [17]. Энергоблок АЭС моделировался как комбинация элементарных геометрических фигур с заданной плотностью внутреннего объема. Параметры объектов включали координаты и плотность материала в предположении о постоянной плотности распределения вещества внутри заданных структур. Дополнительные помещения внутри гермооболочки не моделировались. При прохождении через вещество учитывался только процесс поглощения мюонов. Многократное кулоновское рассеяние не учитывалось. Упрощенная модель структуры энергоблока приведена на рис. 5, где показаны стены гермооболочки и обстройки, основные элементы машинного зала и реакторной установки.

Объекты, имеющие сложную структуру, разбивались на несколько фигур с соответствующей плотностью. Процесс построения матриц (мюоно-



**Рис. 4.** Суммарная матрица числа точек пересечения треков с референтной плоскостью на расстоянии 50 м от детектора.

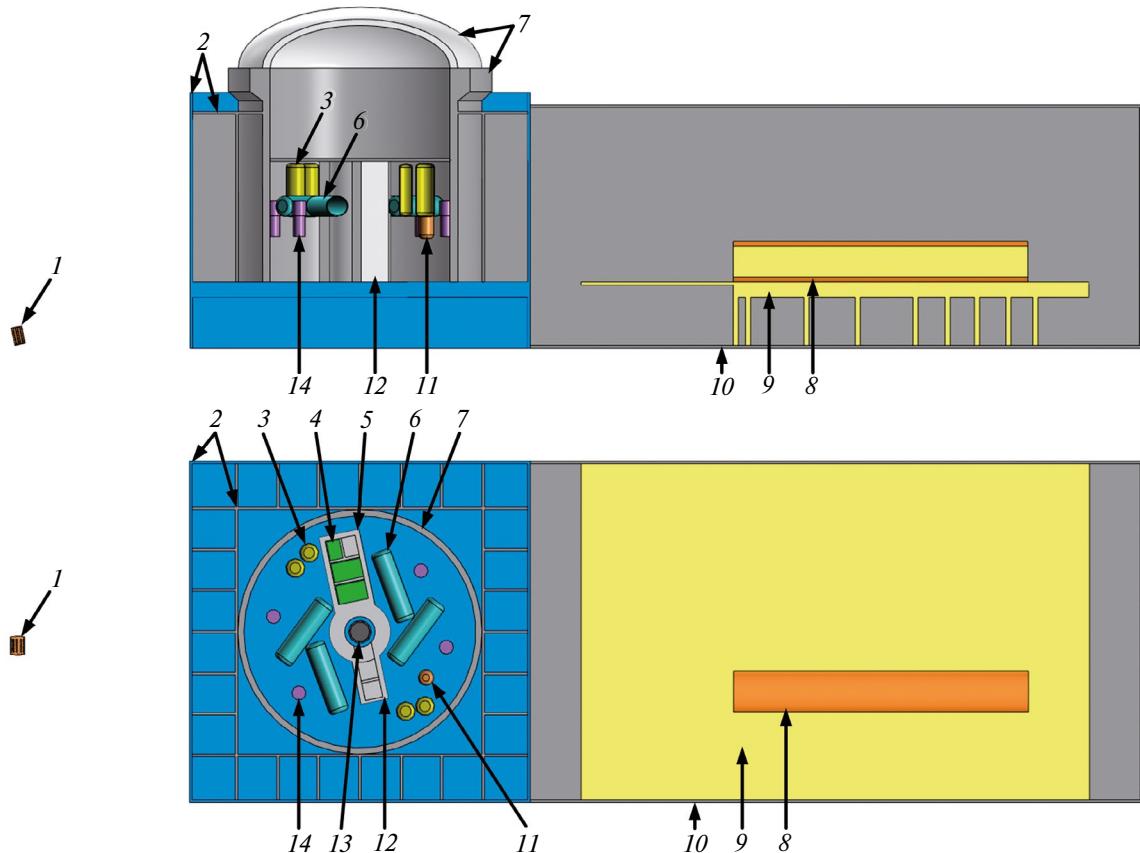
грамм) и моделирования представлен в работах [16] и [17] соответственно. В результате моделирования и обработки данных были получены распределения количества треков, попавших в ячейки матриц-мюонограмм, расположенных на различных расстояниях от ГМГ. После нормировки на угловое распределение мюонов и пересчета величины подавления интенсивности мюонов с учетом потерь мюонов в данных направлениях формировалась матрица в значениях толщин вещества в  $\text{g} \cdot \text{см}^{-2}$  по ячейкам ( $0.4 \times 0.4 \text{ м}^2$ ).

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  $M_1^{\text{mod}}$  количества треков, которые затем пересчитывались в матрицы толщин  $M_{T1}^{\text{mod}}$  с учетом энергетического спектра интенсивности мюонов. Методика получения матриц толщин

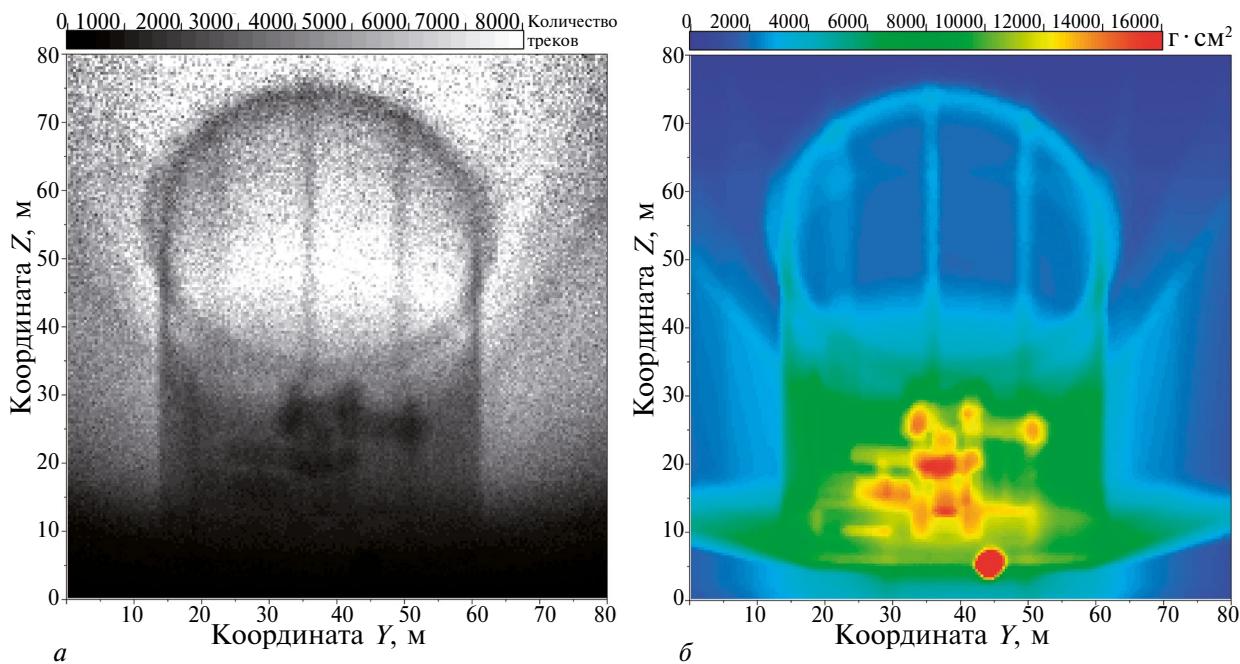
подробно описана в работе [17]. Далее проводилось моделирование с измененной структурой энергоблока: были удалены топливные элементы в одной секции бассейна выдержки, два циркуляционных насоса и блок защитных труб в реакторе, добавлена вода в бассейны и в реактор, а также изменена усредненная плотность вещества турбогенератора. По результатам обработки данных были получены соответствующие матрицы  $M_2^{\text{mod}}$  и  $M_{T2}^{\text{mod}}$ , которые были названы динамическими.

Модельные мюонограммы  $M_1^{\text{mod}}$  и  $M_{T1}^{\text{mod}}$  с ячейками  $0.4 \times 0.4 \text{ м}^2$  на расстоянии 62 м от центра ГМГ, полученные для штатного состояния энергоблока, показаны на рис. 6. На данных матрицах отчетливо проявляются элементы реакторной установки и бетонных стен. В нижней части мюонограммы хорошо видна проекция турбогенератора.

В результате вычитания матрицы  $M_2^{\text{mod}}$  из  $M_1^{\text{mod}}$  при соответствующей нормировке на ста-



**Рис. 5.** 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.



**Рис. 6.** Модельная матрица распределения количества треков (а) и толщин вещества (б) на расстоянии 62 м от центра детектора.

тистику  $d$  получается разностная матрица  $M_3^{\text{мод}}$  [16] в единицах среднеквадратичного отклонения (сигмах):

$$M_3^{\text{мод}} = \frac{M_2^{\text{мод}} - M_1^{\text{мод}} \cdot d}{\sqrt{M_1^{\text{мод}} \cdot d}}, \quad (1)$$

$$d = \frac{\sum_{i,j} (M_2^{\text{мод}}[i,j])}{\sum_{i,j} (M_1^{\text{мод}}[i,j])}. \quad (2)$$

Для улучшения качества областей выявленных отклонений при вычитании матриц применялся гауссовский фильтр низких частот. В случае вычитания матриц толщин используется прямое вычитание одной матрицы из другой с предварительным применением медианного фильтра:

$$M_{T3}^{\text{мод}} = M_{T2}^{\text{мод}} \cdot M_{T1}^{\text{мод}}. \quad (3)$$

Пример разностных матриц для точки 62 м от центра детектора представлен на рис. 7. Матрица  $M_3^{\text{мод}}$  отображает основные различия между штатным  $M_1^{\text{мод}}$  и динамическим  $M_2^{\text{мод}}$  состояниями. Из рисунков видно, что разностная матрица  $M_{T3}^{\text{мод}}$  по толщинам более информативна,

чем матрица по количеству треков  $M_3^{\text{мод}}$ . Эти изображения предоставляют качественную оценку метода реконструкции, которую можно сравнить с экспериментальными данными. В разностной матрице количества треков более темный оттенок указывает на дефицит частиц, светлый — 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.

### 3.2. Мюонография энергоблока АЭС во время ремонтных работ

Тестирование разработанной методики мюонографии динамических изменений в структуре энергоблока АЭС было осуществлено во время планово-предупредительных работ (ППР), проходящих в несколько этапов, основными из которых являются замена топлива и оборудования. Для поиска изменений в структуре энергоблока с помощью мюонографии в экспериментальных данных было выделено несколько периодов: штатная работа реактора осенью 2022 г. (409 ч живого времени годоскопа) и весной 2023 (162 ч живого времени), перегрузка (91 ч живого времени) и выгрузка (147 ч живого времени) топлива во время ППР и штатная работа летом 2023 г. (150 ч живого времени). Для каждого из этих периодов были построены матри-

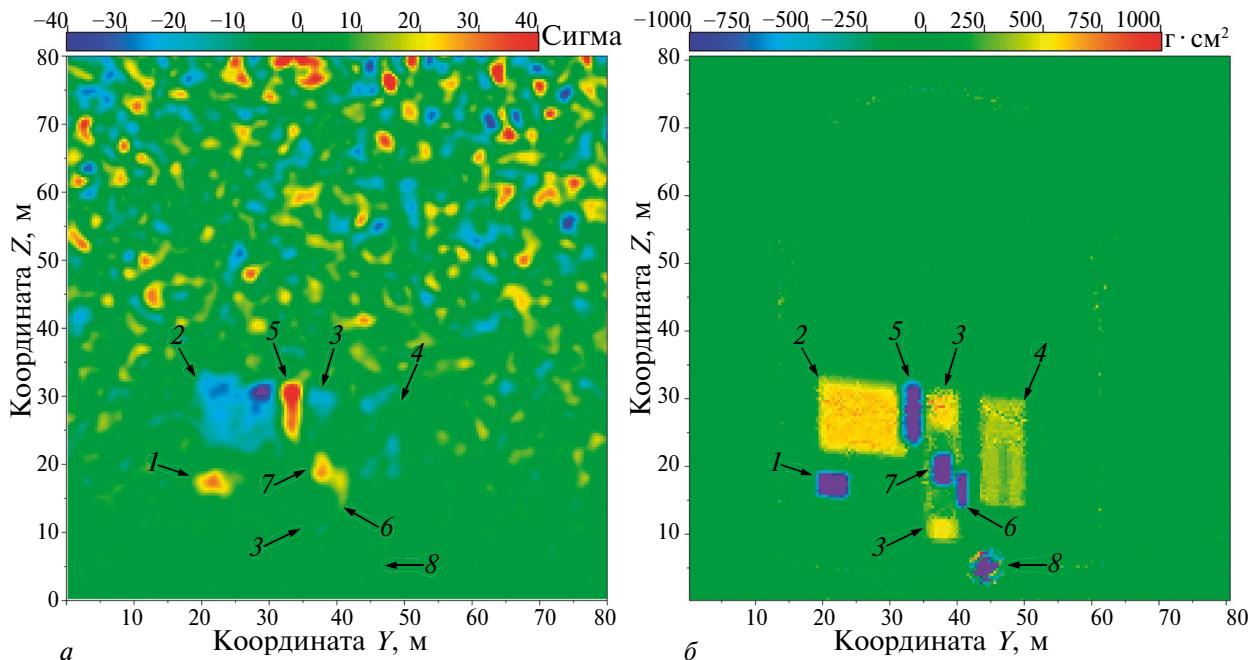
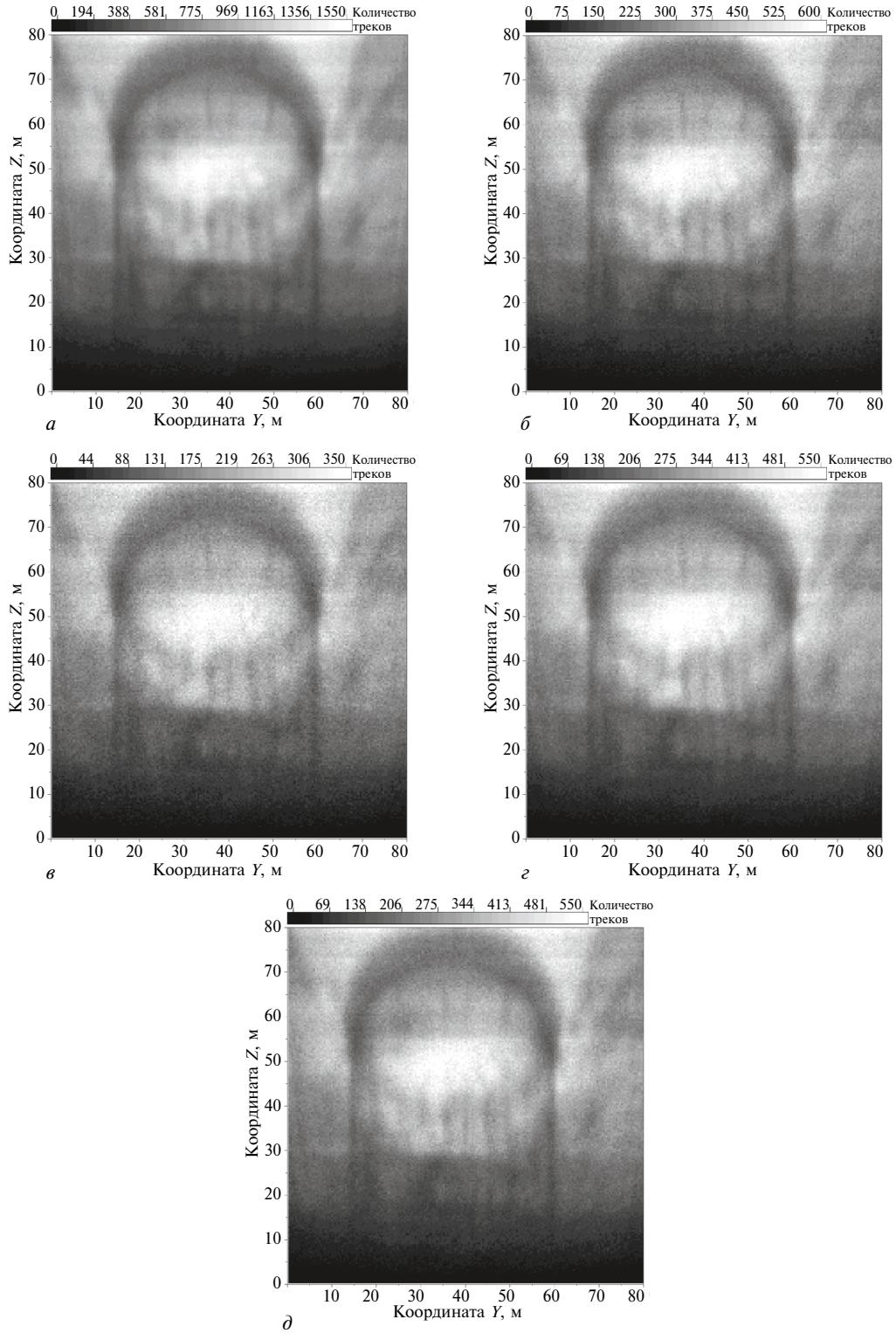


Рис. 7. Модельная разностная матрица количества треков (а) и толщин вещества (б) на расстоянии 62 м от центра детектора: 1 — уран в бассейне выдержки; 2, 3, 4 — вода в бассейнах и реакторе; 5, 6 — циркуляционные насосы; 7 — блок защитных труб; 8 — турбогенератор.

цы по плотности треков частиц в ячейках, пример которых на расстоянии 62 м от центра детектора показан на рис. 8.

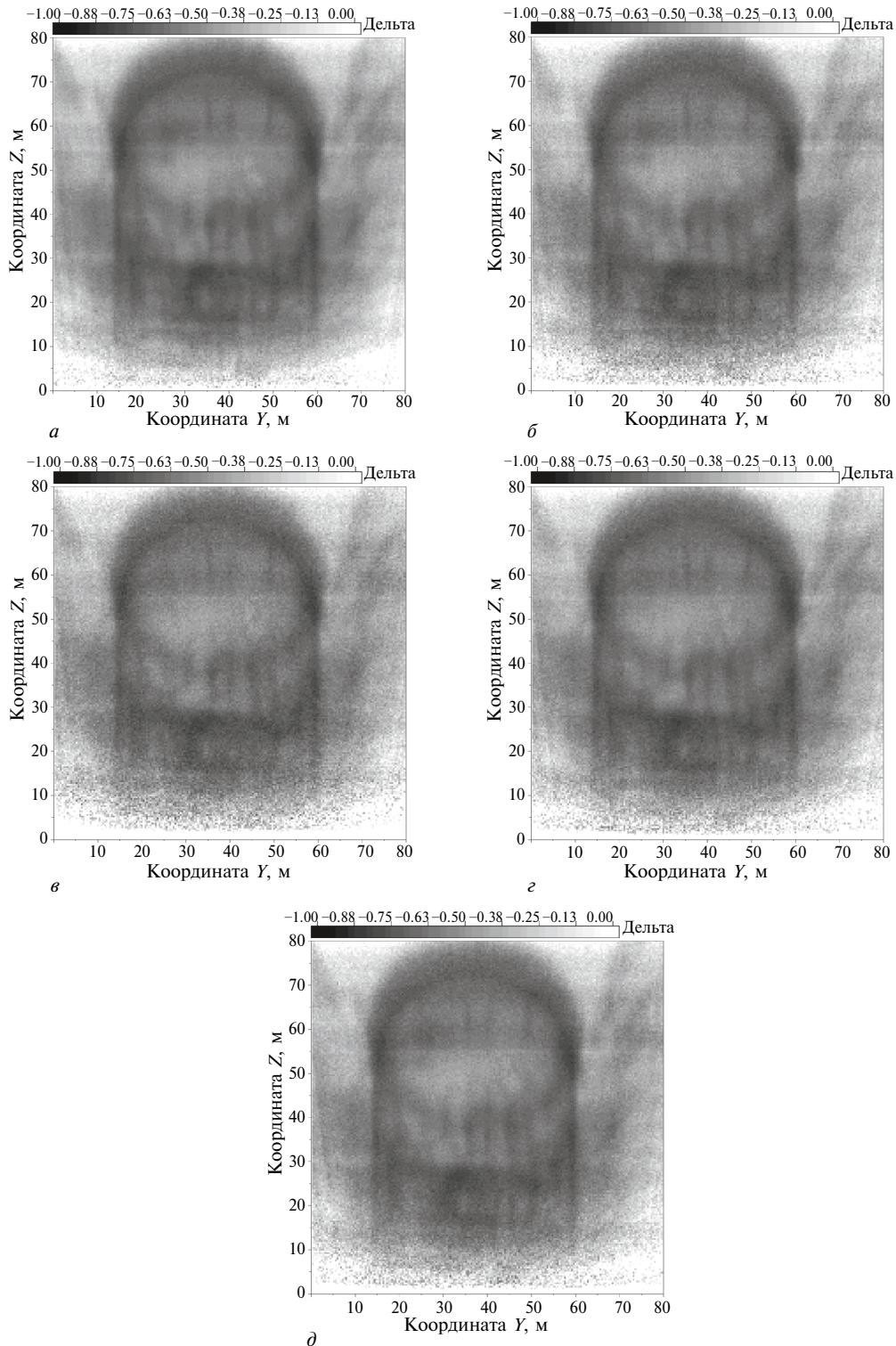
В первом приближении по этим матрицам трудно выявить изменения. Для более эффективного проявления структуры наблюдаемого объекта ма-



**Рис. 8.** Экспериментальные матрицы по плотности точек реконструированных треков. *а* – Штатная работа осенью 2022 г.; *б* – штатная работа весной 2023; *в* – перегрузка топлива летом 2023; *г* – выгрузка топлива летом 2023; *д* – штатная работа летом 2023.

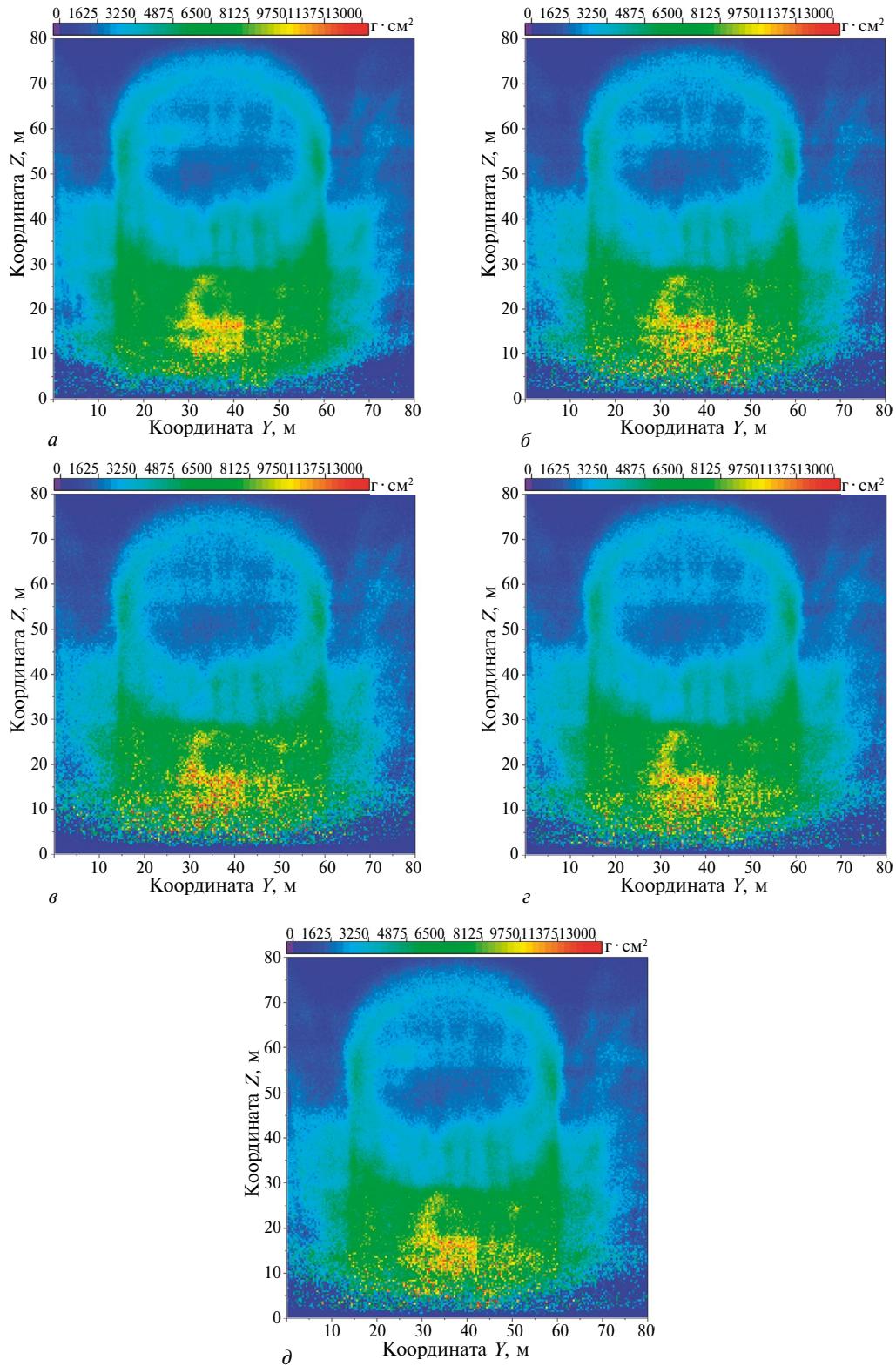
трицы были нормированы на чистый модельный спектр мюонов. В результате были получены матрицы относительных отклонений модельных ма-

триц от экспериментальных с учетом нормировки на разницу статистики в безразмерных единицах “дельта” (рис. 9) и матрицы толщин в единицах



**Рис. 9.** Матрицы относительных отклонений модели от эксперимента. *a* — Штатная работа осенью 2022 г.; *b* — штатная работа весной 2023; *c* — перегрузка топлива летом 2023; *g* — выгрузка топлива летом 2023; *d* — штатная работа летом 2023.

$\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$  (рис. 10). Как видно из результатов, матрицы являются подобными, и при прямом рассмотрении явных изменений в их структуре не наблюдается.

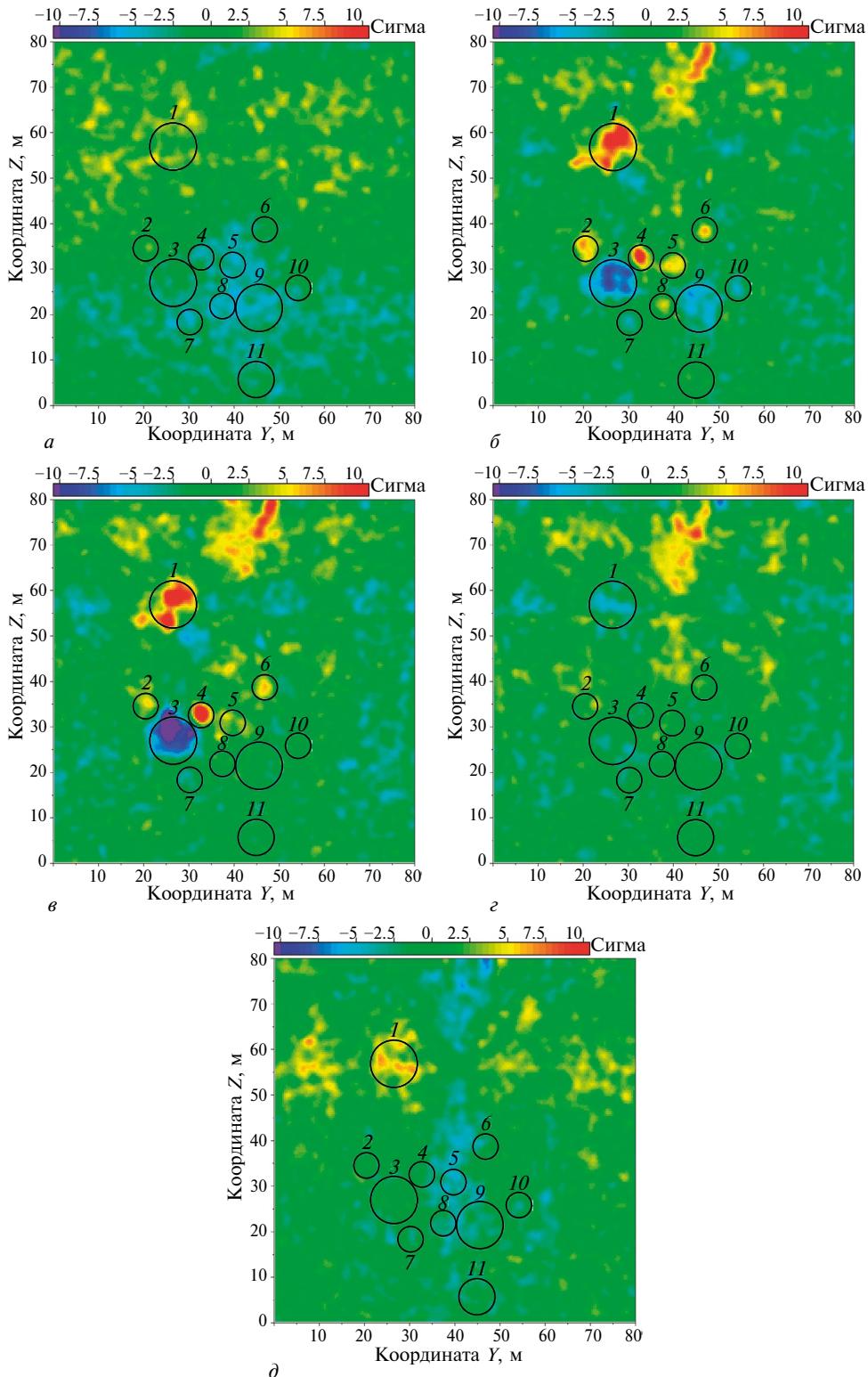


**Рис. 10.** Экспериментальные матрицы толщин. *а* – Штатная работа осенью 2022 г.; *б* – штатная работа весной 2023; *в* – перегрузка топлива летом 2023; *г* – выгрузка топлива летом 2023; *д* – штатная работа летом 2023.

Для выявления изменений в реакторной зоне во время ремонтных работ были построены разностные матрицы по плотности точек (1) и тол-

щинам (3), которые представлены на рис. 11 и 12 соответственно. Эти матрицы получены путем вычитания из матриц, полученных в период из-

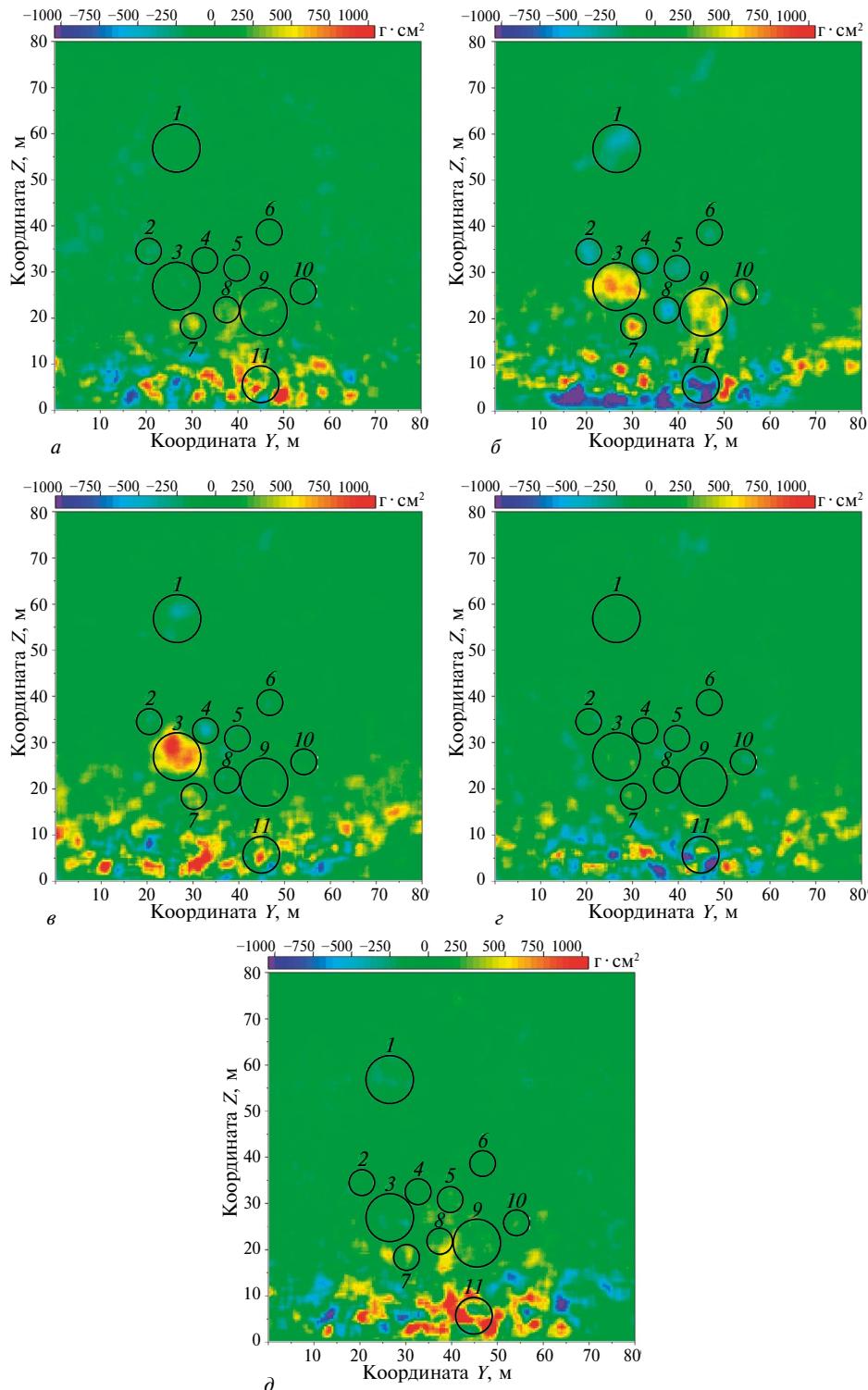
менений, матриц, полученных в период штатной работы реактора. В качестве контрольных матриц, демонстрирующих надежность данных мюонного



**Рис. 11.** Разностная матрица по количеству треков. *а* — Весна 2023 минус осень 2022 г.; *б* — перегрузка топлива 2023 минус осень 2022; *в* — выгрузка топлива 2023 минус осень 2022; *г* — лето 2023 минус осень 2022; *д* — весна 2023 минус лето 2023.

годоскопа, были построены матрицы, отражающие разницу между периодами штатной работы реактора: осенью 2022 г., весной 2023 г. и летом 2023 г. после ремонтных работ.

На матрицах, полученных в течение различных этапов ППР, были выявлены 11 областей с изменениями, которых нет на контрольных матрицах. В разностной матрице по количеству треков обла-



**Рис. 12.** Разностная матрица по толщинам. *а* – Весна 2023 минус осень 2022 г.; *б* – перегрузка топлива 2023 минус осень 2022; *в* – выгрузка топлива 2023 минус осень 2022; *г* – лето 2023 минус осень 2022; *д* – весна 2023 минус лето 2023.

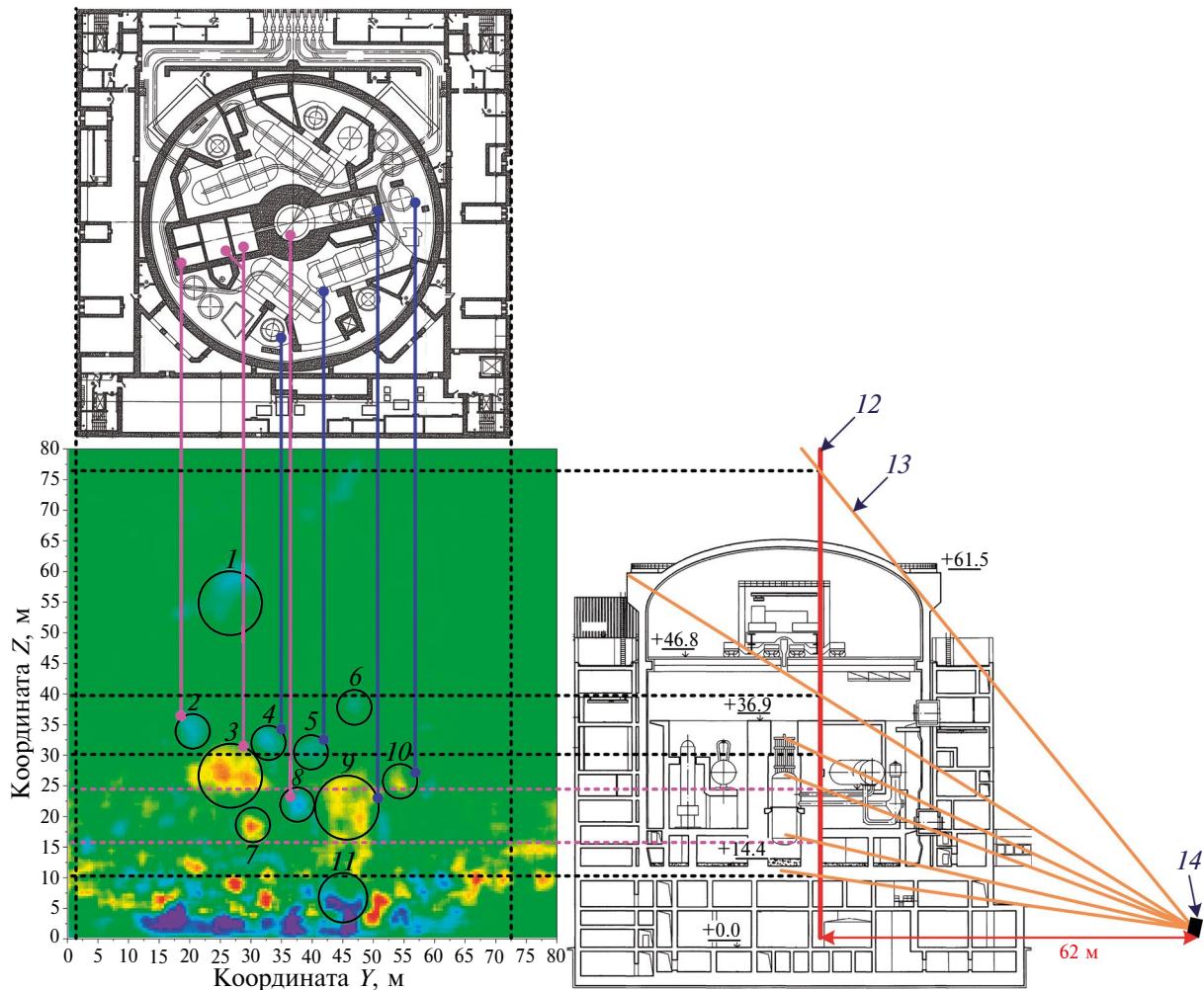
сти синего цвета указывают на недостаток событий в угловом распределении мюонов, а области красного цвета — на избыток. Эти изменения связаны с перемещением различных материалов и оборудования внутри реакторного блока. Избыток в нижней части на рис. 12 вызван расхождением экспериментального и используемого модельного спектров частиц при зенитных углах больше 85 градусов (окологоризонтальные события). Возможно, расхождение можно объяснить увеличением потока мюонов вблизи горизонта [18]. Стоит отметить, что перегрузка и выгрузка топлива проходят несколько дней совместно с выполнением других плановых работ. Потому конечное изображение является интегральным по всем изменениям, происходящим в энергоблоке. 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. 13. На данном рисунке для удобства восприятия изображения на матрице с помощью линий приведены направления по двум видам реакторного здания — сбоку и сверху.

Во время ППР были выполнены следующие работы:

- извлечение крышки реактора (область 8 на рис. 13) с использованием оснастки (область 5) и мостового крана (область 1 и 6) и ее установка в специальную шахту (область 10);
- извлечение блока защитных труб (область 8) и его установка в бассейн перегрузки (область 9);
- перегрузка в бассейн выдержки (область 3) тепловыделяющих сборок из реактора (область 7), а затем из бассейна выдержки в транспортный контейнер (область 2);
- извлечение циркуляционного насоса (области 4);



**Рис. 13.** Соотношение матрицы со схемой энергоблока: 1 и 6 — кран; 2 — транспортный контейнер; 3 — бассейн выдержки; 4 — циркуляционный насос; 5 — оснастка; 7 — тепловыделяющие сборки в бассейне выдержки; 8 — блок защитных труб; 9 — бассейн перегрузки; 10 — крышка реактора; 11 — турбина машинного зала; 12 — референтная плоскость; 13 — выделенные направления треков частиц; 14 — детектор.

— частичный разбор турбогенератора (область *II*) с использованием крана машинного зала.

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

Для оценки скорости обнаружения изменений были построены матрицы за 24 ч 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. 14 в качестве примера показаны однодневные матрицы в конце ППР (аналогичные матрицам на рис. 11). Видно, как по мере уменьшения количества перемещений объектов в области бассейна выдержки количества областей с динамическими изменениями также уменьшаются.

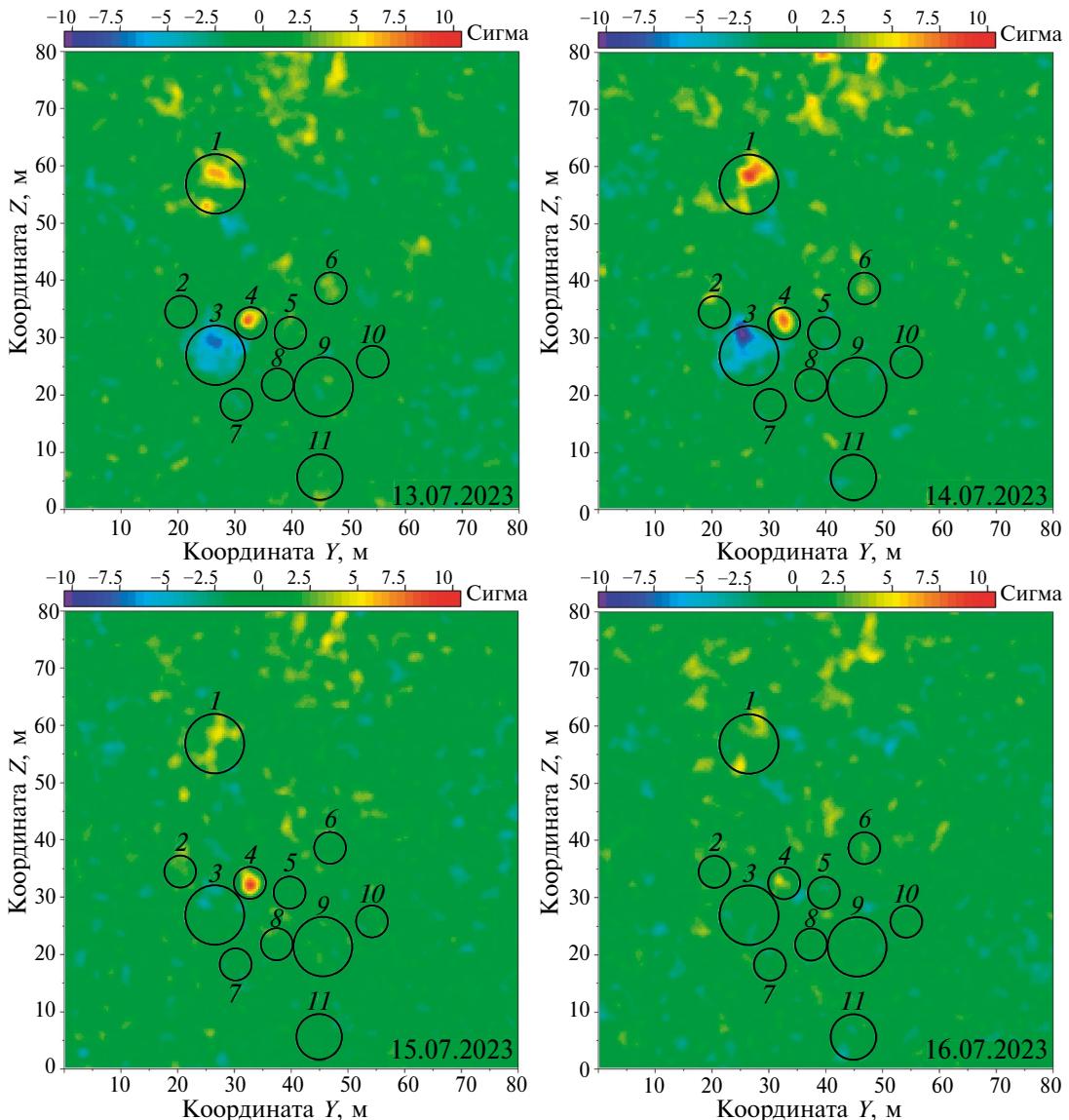


Рис. 14. Суточная разностная матрица по количеству треков.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный в НИЯУ МИФИ гибридный мюонный годоскоп был использован для мюонографии работающего энергоблока Калининской АЭС с реактором ВВЭР-1000. Годоскоп, установленный вне энергоблока, продемонстрировал возможность визуализации структуры работающего энергоблока.

Большие толщины структурных объектов реакторного блока и их проецирование на реактор не позволили в текущей конфигурации эксперимента получить чистую мюонограмму активной зоны. Однако примененный разностный метод построения мюонограмм позволил обнаружить различные динамические изменения в конструкции энергоблока в период ремонтных работ. Анализ суточных данных показал, что в текущем

положении ГМГ относительно ядерного реактора достаточно по крайней мере 24 ч для выявления изменений в структуре реакторного блока.

Мобильность ГМГ дает возможность последовательного получения мюонограмм с различных направлений. Реализация такого полномасштабного эксперимента в будущем даст возможность оценить эффективность 3D-мюонографии.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллектив НОЦ НЕВОД за помощь в создании, тестировании и развертывании ГМГ на Калининской АЭС, а также за плодотворное обсуждение результатов. Кроме того, авторы благодарят сотрудников Калининской АЭС и филиала АО ВНИИАЭС (г. Удомля) за оказанную помощь в проведении экспериментальных исследований.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Разработка и исследование гибридного мюонного гаммоскопа проводились в рамках договора между Национальным исследовательским ядерным университетом “МИФИ” и АО “Всероссийский Научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций” от 19.11.2019 № 00-3-700-0650 и договора АО “Всероссийский Научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций” с АО “Наука и инновации” от 09.04.2019 № 313/1658-Д.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Kume, H. Miyadera, C. L. Morris, J. Bacon, K. N. Borozdin, J. M. Durham, K. Fuzita, E. Guardincerri, M. Izumi, K. Nakayama, M. Saltus, T. Sugita, K. Takakura, and K. Yoshioka, *JINST* **11**, P09008 (2016);  
<http://doi.org/10.1088/1748-0221/11/09/P09008>
2. H. Fujii, K. Hara, S. Hashimoto, K. Hayashi, F. Ito, H. Kakuno, H. Kodama, K. Nagamine, K. Sato, K. Satoh, S. Kim, A. Suzuki, T. Sumiyoshi, K. Takahashi, Y. Takahashi, F. Takasaki, S. Tanaka, and S. Yamashita, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2019**, 053C01 (2019);  
<http://doi.org/10.1093/ptep/ptz040>
3. H. Fujii, M. Gi, K. Hara, S. Hashimoto, K. Hayashi, H. Kakuno, H. Kodama, M. Mizokami, S. Mizokami, K. Nagamine, K. Sato, S. Sekita, H. Shirai, S. Kim, T. Sumiyoshi, A. Suzuki, Y. Takada, K. Takahashi, Y. Takahashi, F. Takasaki, D. Yamada, and S. Yamashita, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2021**, 023C01 (2021);  
<http://doi.org/10.1093/ptep/ptaa137>
4. J. Perry, M. Azzouz, J. Bacon, K. Borozdin, E. Chen, J. Fabritius II, E. Milner, H. Miyadera, C. Morris, J. Roybal, Z. Wang, B. Busch, K. Carpenter, A. A. Hecht, K. Masuda, C. Spore, N. Toleman, D. Aberle, and Z. Lukic, *J. Appl. Phys.* **113**, 184909 (2013);  
<http://doi.org/10.1063/1.4804660>
5. K. Bridges, J. Coleman, R. Collins, J. Dasari, G. Holt, C. Metelko, A. Morgan, M. Murdoch, Y. Schnellbach, I. Tsurin, R. W. Mills, M. Ryan, G. Edwards, and A. Roberts, *JINST* **18**, P02024 (2023);  
<http://doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/P02024>
6. B. Lefevre, H. Gomez, S. Procureur, D. Attie, L. Gallego, P. Gonzales, M. Lehuraux, B. Lesage, I. Mandjavidze, P. Mas, and D. Pomarede, *EPJ Web Conf.* **288**, 07001 (2023);  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/202328807001>
7. S. Procureur, D. Attie, L. Gallego, H. Gomez, P. Gonzales, B. Lefevre, M. Lehuraux, B. Lesage, I. Mandjavidze, P. Mas, and D. Pomarede, *Sci. Adv.* **9**, eabq8431 (2023);  
<http://doi.org/10.1126/sciadv.abq8431>
8. A. Clarkson, D. J. Hamilton, M. Hoek, D. G. Ireland, J. R. Johnstone, R. Kaiser, T. Keri, S. Lumsden, D. F. Mahon, B. McKinnon, M. Murray, S. Nutbeam-Tuffs, C. Shearer, G. Yang, and C. Zimmerman, *JINST* **10**, P03020 (2015);  
<http://doi.org/10.1088/1748-0221/10/03/P03020>
9. J. M. Durham, D. Poulson, J. Bacon, D. L. Chichester, E. Guardincerri, C. L. Morris, K. Plaud-Ramos, W. Schwendiman, J. D. Tolman, and P. Winston, *Phys. Rev. Applied.* **9**, 044013 (2018);  
<http://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.044013>
10. International Atomic Energy Agency, Nuclear Technology Review (Vienna, 2019);  
<https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc63-inf2.pdf>
11. International Atomic Energy Agency, Muon Imaging: Present Status and Emerging Applications (Vienna, 2022);  
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2012web.pdf>
12. Н. С. Барбашина, В. В. Борог, Р. П. Кокоулин, К. Г. Компаниец, А. А. Петрухин, Д. А. Тимашков, В. В. Шутенко, И. И. Яшин, Патент RU2406919C2 от 20.12.2010 на сайте Федерального института промышленной собственности, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/4e/6d/b5/12929dad5e5150/RU2406919C2.pdf>
13. И. И. Астапов, М. М. Каверзnev, Ю. Н. Конев, А. А. Петрухин, С. С. Хохлов, И. И. Яшин, 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>
14. N. A. Pasyuk, A. A. Borisov, K. G. Kompaniets, A. S. Kozhin, R. M. Fakhruddinov, M. Yu. Tselinenko, V. V. Shutenko, and I. I. Yashin, *Instrum. Exp. Tech.* **67**, 219 (2024);  
<http://doi.org/10.1134/S0020441224700489>
15. N. A. Pasyuk, K. G. Kompaniets, A. A. Petrukhin, M. Yu. Tselinenko, V. V. Shutenko, and I. I. Yashin, *Instrum. Exp. Tech.* **67**, 672 (2024);  
<http://doi.org/10.1134/S0020441224701069>

16. N. A. Pasyuk, N. N. Davidenko, A. S. Kozhin, K. G. Kompaniets, Yu. N. Konev, S. V. Oleinik, A. A. Petrukhin, R. M. Fakhrutdinov, M. Yu. Tselinenko, D. V. Shudra, V. V. Shutenko, and I. I. Yashin, *Tech. Phys.* **69**, 1296 (2024);  
<http://doi:10.61011/TR.2024.08.59019.40-24>
17. Н. А. Пасюк, Р. Р. Альев, Н. Н. Давиденко, С. М. Киселев, А. С. Кожин, К. Г. Компаниет, Ю. Н. Конев, С. В. Оleinik, А. А. Петрухин, Р. М. Факрутдинов, М. Ю. Тселиненко, Д. В. Шудра, В. В. Шутенко, и И. И. Яшин, *Тех. физ.* **69**, 1296 (2024);  
<http://doi:10.61011/JTF.2025.01.59477.251-24>
18. С. В. Олейник, А. А. Петрухин, Р. М. Фахрутдинов, М. Ю. Целиненко, В. В. Шутенко, И. И. Яшин, *ЖТФ* **95**, 179 (2025);  
<http://doi:10.61011/JTF.2025.01.59477.251-24>
18. Е. И. Яковлева, В. А. Хомяков, and С. С. Хокхлов, *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **43**, 298 (2016);  
<https://doi.org/10.3103/S1068335616100031>

## DIAGNOSTICS OF THE STRUCTURE OF A NUCLEAR POWER PLANT UNIT USING MUONOGRAPHY

© 2025 N. A. Pasyuk<sup>1)</sup>, R. R. Alyev<sup>2)</sup>, N. N. Davidenko<sup>3)</sup>, S. M. Kiselev<sup>2)</sup>, A. S. Kozhin<sup>1),4)</sup>, K. G. Kompaniets<sup>1)</sup>, Yu. N. Konev<sup>3)</sup>, S. V. Oleinik<sup>3)</sup>, A. A. Petrukhin<sup>1)</sup>, R. M. Fakhrutdinov<sup>1),4)</sup>, M. Yu. Tselinenko<sup>1)</sup>, V. V. Shutenko<sup>1)</sup>, I. I. Yashin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2)</sup>Branch JSC “Rosenergoatom Concern” “Kalinin Nuclear Power Plant”, Udomlya, Russia

<sup>3)</sup>All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation, Moscow, Russia

<sup>4)</sup>National Research Center “Kurchatov Institute” — IHEP, Protvino, Russia

In 2022, a hybrid muon hodoscope with a sensitive area of  $3 \times 3 \text{ m}^2$  for studying the internal structure of large-scale objects using the muonography method was created at MEPhI. The hodoscope's detecting system has a hybrid structure. It consists of a scintillation strip detector and a drift tube detector and is designed to record tracks of charged particles. The muonography method is based on the use of cosmic ray muons as penetrating radiation for “translucence” (analogous to radiography) of large-scale objects. Experimental studies of the internal structure of the Kalinin NPP power unit using the muonography method were carried out in 2022–2023. The paper presents a brief description of the design of a hybrid muon hodoscope, as well as the results of an experiment on diagnostics of the power unit structure using this method, which was carried out during the scheduled power unit's maintenance. The purpose of the experiment was to develop a method for real-time detection of changes in the structure of a reactor unit during its maintenance.