

НЕИНВАЗИВНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ НА ОСНОВЕ МЮОНОГРАФИИ

*А. Б. Александров¹, С. Г. Васина^{1,2}, В. И. Галкин³,
А. А. Гиппиус¹, В. М. Грачев⁴, Г. В. Калинина¹,
А. С. Коновалов⁵, Н. С. Коновалова¹, П. С. Королев⁶,
А. А. Ларионов⁴, А. К. Манагадзе⁷, И. А. Мельниченко⁸,
Н. М. Окатьева¹, Н. Г. Полухина^{1,4,8,*}, Т. М. Роганова⁷,
Ж. Т. Садыков^{1,8}, Н. И. Старков¹, Е. Н. Старкова¹,
В. Э. Тюков¹, М. М. Чернявский¹, В. И. Шевченко⁴,
Т. В. Щедрина¹*

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

⁵ Российский государственный геологоразведочный университет
им. С. Орджоникидзе, Москва

⁶ Московская духовная академия Русской православной церкви,
Сергиев Посад, Россия

⁷ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

⁸ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

Работа посвящена развитию инновационного неинвазивного метода мюонографии с использованием ядерной фотоэмульсии, основанного на регистрации изменений потоков атмосферных мюонов, проходящих через исследуемый объект, и позволяющего определять особенности его внутренней структуры. Современные автоматизированные сканирующие комплексы дают возможность проводить масштабные исследования крупных природных и промышленных объектов, требующие обработки больших объемов фотоэмульсии. Дается подробное описание крупного мюонографического эксперимента по изучению внутренней структуры зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря.

The work is devoted to an innovative non-invasive method of muonography being developed on base of emulsion detectors, which registers the changes in the fluxes of atmospheric muons passing through the object under study, and allows determination

* E-mail: polukhinang@lebedev.ru

of its internal structure features. Modern automated scanning complexes enable to carry out studies of large-scale natural and industrial objects that require processing large volumes of photoemulsion. A detailed description of a large muonographic experiment to study the internal structure of buildings and the territory of the Holy Trinity Danilov Monastery is given.

PACS: 06.30.-k; 14.60.Ef; 29.40.Rg; 89.20.Bb; 07.05.Kf

ВВЕДЕНИЕ

Активно развивающийся метод мюнографии (МР) предназначен для исследования внутренней структуры крупных промышленных и природных объектов и основан на анализе степени поглощения потоков атмосферных мюонов космического происхождения при их прохождении через изучаемый объект (см. [1–4]).

Использование атмосферных мюонов в качестве зондирующего излучения для «просвечивания» крупных объектов, вплоть до километрового размера, определяется физическими свойствами этих частиц. Мюоны образуются в верхних слоях атмосферы при взаимодействии частиц первичного космического излучения с атомами атмосферы Земли [5]. Являясь нестабильными частицами с временем жизни $2,197 \cdot 10^{-6}$ с, мюоны с энергиями порядка сотен гэраэлектронвольт и выше вследствие эффекта релятивистского замедления времени преодолевают до распада весьма значительные расстояния и проникают на глубину до 2 км скального грунта [6]. Их потоки у поверхности Земли достаточно велики (около одной частицы на 1 см^2 в минуту для энергий $E_\mu > 1 \text{ ГэВ}$) и составляют до 80% всех частиц космического происхождения на этом уровне наблюдения [7].

При пересечении атмосферными мюонами плотного объекта на поверхности Земли (геологических пород или строительных материалов) происходит дополнительное поглощение их потока, степень которого зависит от плотности вещества. Когда на пути потока мюонов встречается вещество с другой плотностью, интенсивность его поглощения в данном направлении меняется. На этом и основан метод мюнографии. Непоглощенные в веществе объекта частицы могут быть зарегистрированы с помощью чувствительного устройства (например, ядерной фотоэмульсии). Фиксируя с помощью измерительной аппаратуры различия потоков мюонов, проходящих через объект с разных направлений, можно локализовать «скрытые» внутри объекта области с различной плотностью вещества без его разрушения. Анализ углового распределения мюонов после прохождения через объект позволяет сделать заключение о поглощающей способности этого объекта в различных направлениях и, соответственно, о наличии неоднородностей в его структуре.

На протяжении последних двух десятилетий во многих странах осуществлялись активная разработка метода мюнографии и подготовка

проектов по исследованию этим методом геофизических структур на поверхности Земли [8–12] и Марса [13], археологических [14–16] и промышленных объектов [17], в том числе объектов ядерной энергетики [18]. Анализируются возможности применения метода при разведке полезных ископаемых [19–21]. Отдельно стоит отметить проекты по мониторингу состояния активной зоны реактора атомной станции Фукусима-1 в Японии, поврежденного цунами в 2011 г. [22–25], в том числе с использованием технологии ядерных фотоэмульсий. В настоящее время развитие метода вступает в фазу широкого применения в научно-исследовательских и коммерческих целях.

Регистрирующими устройствами в экспериментах по мюнографии служат трековые детекторы элементарных частиц различных типов, как электронные (см., например, [17, 21, 26, 27]), так и эмульсионные [12, 15, 28–32]. Фотографическая эмульсия представляет собой суспензию с включением светочувствительных микрокристаллов галогенидов серебра, равномерно распределенных в желатине или другом защитном коллоиде [33], которая наносится с двух сторон на тонкую, порядка сотен микрометров, пластиковую основу (двусторонняя ядерная эмульсия). К основным преимуществам трековых детекторов на основе ядерной фотоэмульсии, помимо компактных размеров и простоты конструкции, относятся высокое пространственное (< 1 мкм) и угловое разрешение (~ 1 мср, что соответствует примерно 15 м при протяженности объекта 1 км), большая информационная емкость и простота эксплуатации, которая заключается в независимости от источников энергоснабжения и отсутствии необходимости электронной считывающей системы в процессе экспозиции.

В процессе освоения и развития мюнографии на основе эмульсионных детекторов авторами было выполнено несколько экспериментов (см. [28–32]), в числе которых изучение подземного археологического объекта (возможно, древнейшего в России христианского культового сооружения) в исторической крепости Нарын-Кала в г. Дербенте [34, 35]. Настоящая статья посвящена результатам исследования, проведенного в Свято-Троицком Даниловом монастыре в г. Переславле-Залесском Ярославской области.

1. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представленный эксперимент является совместной работой нескольких российских институтов (МИСиС, ФИАН, НИИЯФ МГУ, ООО «АВК Славич»). Его целью является изучение скрытой структуры зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря, основанного в г. Переславле-Залесском в 1508 г. За долгую историю комплекс монастыря неоднократно реконструировался, а историческая документация, включающая планы построек, была безвозвратно утеряна. С помощью «просвечивания» мюонами зданий и подземных зон монастыря предпо-



Рис. 1 (цветной в электронной версии). Территория Свято-Троицкого Данилова монастыря. Цифрами на красном фоне обозначены области исследований: 1 — подвалы здания церкви Похвалы Божьей Матери (ЦПБМ) и прилегающая территория; 2 — возможные остатки старого фундамента здания церкви Всех Святых (ЦВС); 3 — участок территории между зданиями церквей; 4 — Троицкий собор

лагалось обнаружить возможные скрытые неоднородности искусственно происхождения (подвальные помещения, захоронения или склепы). Ввиду ограниченной возможности проведения раскопок из-за статуса монастыря как объекта культурного наследия ЮНЕСКО применение в данном случае неинвазивного метода мюнографии наиболее целесообразно. Одновременно эта исследовательская работа способствует научно-техническому освоению и развитию самого метода мюнографии в историко-археологической области и является яркой демонстрацией его возможностей.

Предметом изучения в данном эксперименте стали здания церкви Похвалы Божьей Матери и церкви Всех Святых, а также территория между ними (рис. 1).

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте были использованы эмульсионные детекторы, которые представляют собой автономные модульные, легко перемещаемые устройства, не требующие присутствия операторов и источников электропитания, выдерживающие продолжительные экспозиции и обеспечивающие благодаря высокому пространственному разрешению детальную картину особенностей структуры объекта наблюдения. При этом сами эмульсионные детекторы не являются источниками загрязнения окружающей среды, поскольку используют естественный фон космического из-

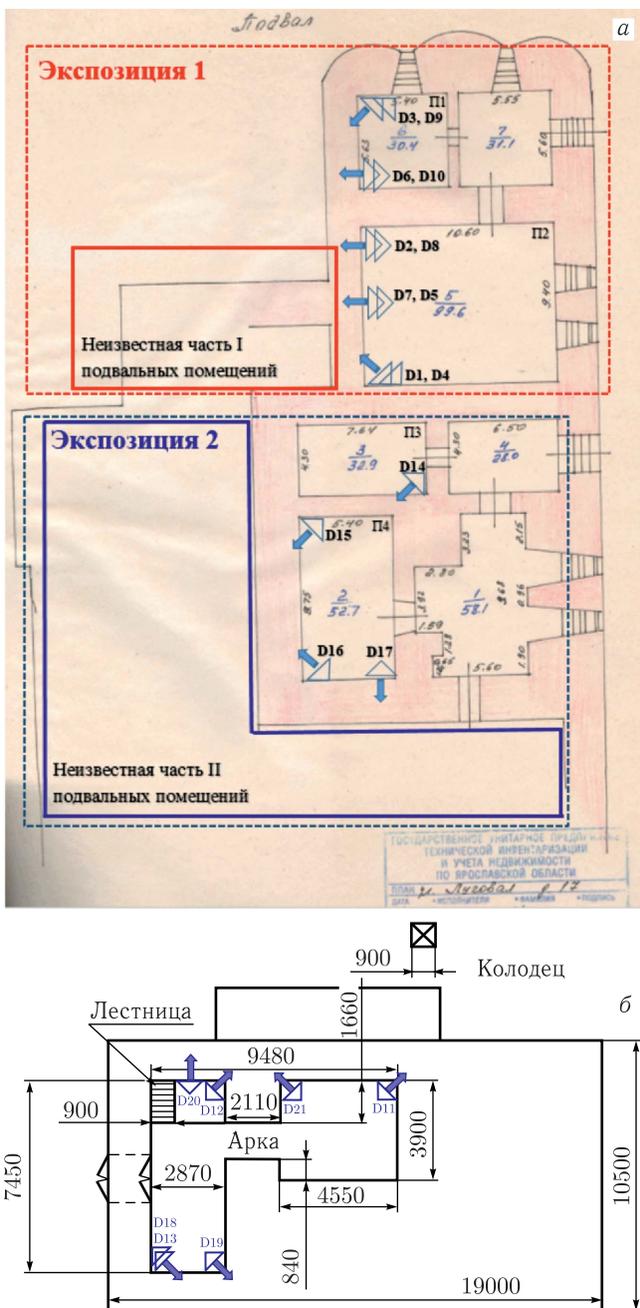


Рис. 2. Схемы установки детекторов: а) экспозиции в подвальных помещениях ЦПБМ (П1–П4); б) экспозиции в подвальных помещениях ЦВС

лучения. Для получения распределения плотности вещества детектор мюонов помещается ниже или сбоку исследуемого объекта.

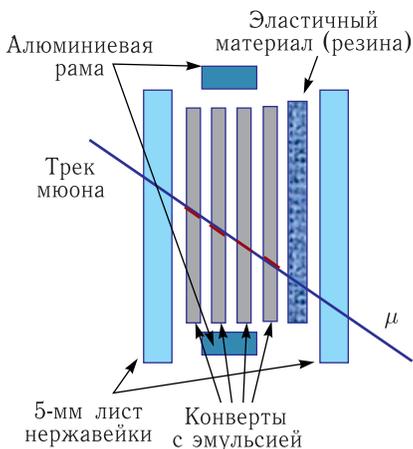
Всего был проэкспонирован 21 эмульсионный детектор: 10 на первом этапе эксперимента (с ноября 2020 г. по февраль 2021 г.) и 11 — на втором (три детектора с декабря 2020 г. по апрель 2021 г. и 8 детекторов с июня по сентябрь 2021 г.).

На рис. 2 показаны планы подвалов церкви Похвалы Божьей Матери (ЦПБМ) (рис. 2, а) и церкви Всех Святых (ЦВС) (рис. 2, б) с расположением детекторов на двух этапах экспозиции. Глубина обоих подвалов составляет около 3 м. На плане бюро технической инвентаризации показан подвал ЦПБМ, где схематично обозначены замурованные части помещений с неизвестной структурой. Детекторы были установлены таким образом, чтобы «увидеть» эти скрытые части подвальных помещений и при этом исключить влияние «тени» от Троицкого собора, расположенного рядом с ЦПБМ (цифра 4 на рис. 1). Детекторы, установленные в ЦВС, были нацелены на поиск фрагментов старого фундамента и исследование участка между зданиями церковью (цифра 3 на рис. 1), где предположительно могут находиться древние захоронения.

В процессе эксперимента было проэкспонировано и обработано в общей сложности около 3 м² ядерной фотоэмульсии, произведенной на российском предприятии ООО «АВК Славич». (Утраченная в 1990-е гг. в России сложная химическая технология производства ядерной фотоэмульсии к настоящему моменту восстановлена благодаря совместным усилиям авторов статьи и специалистов ООО «АВК Славич».) Детекторы представляли собой плотно упакованные стопки из 5–6 двусторонних эмульсионных пластин, неподвижно закрепленных в вертикальном положении с помощью специально разработанной металлической конструкции (рис. 3). Помимо этого, для мониторинга количества зарегистрированных частиц на лицевую часть детекторов в первой экспозиции были помещены дополнительные упаковки по два слоя фотоэмульсии меньшего размера.

Рис. 3. Схема эмульсионного детектора

Использованные в данном эксперименте эмульсионные пластины имели два чувствительных эмульсионных слоя толщиной 50 мкм каждый, политых на пластиковую основу толщиной 175 мкм. Детекторы различались по размерам эмульсионных слоев: в первой экспозиции применялись



пластины размером 20×25 см, а во второй — $10 \times 12,5$ см. Большая площадь эмульсионных слоев в первой экспозиции была связана с тем, что детекторы находились на одном уровне с предполагаемыми подвалами, т. е. регистрировали мюоны, падающие под малыми углами к горизонту. Интенсивность потоков таких мюонов значительно ниже, чем падающих вертикально, поэтому для обеспечения статистической достоверности данных было принято решение использовать детекторы с увеличенным геометрическим фактором. Результаты обработки первой партии детекторов продемонстрировали возможность получить достаточную статистическую обеспеченность данных при меньшей площади детекторов.

Конструкция детекторов была разработана в НИТУ МИСиС и обеспечивала жесткую фиксацию эмульсионных слоев в вертикальном положении. Регулируемые ножки детектора давали возможность выровнять положение детектора по уровню с точностью до 0,5 мм/м. Форма опорной площадки детектора позволяла однозначно ориентировать детектор в направлении вперед-назад по отношению к исследуемой области. Фотография пары детекторов, установленных по уровню на месте экспозиции в одном из подвальных помещений ЦПБМ, приведена на рис. 4.

Длительность облучения первой партии детекторов была определена на основе модельных расчетов в диапазоне от 1,5 до 4 мес. Во время эксперимента проводился постоянный мониторинг количества зарегистрированных мюонов с помощью дополнительных эмульсионных слоев, упакованных



Рис. 4. Детекторы первой экспозиции, установленные в подвале ЦПБМ. Положение детекторов контролировалось по уровню

ванных в светонепроницаемые пакеты и помещенных на лицевую часть детекторов. На основе этих данных, а также по результатам обработки первой партии детекторов была определена оптимальная длительность облучения, составившая 3 мес.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Мюнография использует те же основные принципы, что и рентгенография, с той разницей, что объект «просвечивается» с помощью естественного космического излучения, а измерения осуществляются трековыми детекторами.

Необходимым этапом эксперимента, осуществляемого методом мюнографии, является моделирование распределения мюонных потоков в исследуемой области и формируемого этими потоками отклика детектора.

Для описания процесса прохождения мюонов через сложные объекты используется алгоритм, описанный в [36, 37], в соответствии с которым создается пространственная модель объекта с указанием положения детектора и совмещенного с ним начала координат. Из точки начала координат проводятся воображаемые лучи, проходящие через объект и имитирующие траектории мюонов, направления которых задаются азимутальным углом Φ и зенитным углом Θ . Затем определяются точки пересечения этих лучей с границами элементов объекта и определяются длины пробега мюонов в этих элементах с учетом образующих их материалов. Исходный поток мюонов, проходя через слой материала, ослабляется в результате поглощения наиболее медленных частиц. Зная длину пути в материале и энергетический спектр мюонов, можно определить ослабление потока. Ослабленный поток, проходя через следующий слой материала, ослабевает еще больше и т. д. Продолжая этот процесс до последнего слоя, можно получить расчетный поток мюонов, регистрируемых детектором на выходе из объекта. При моделировании используются следующие параметры: форма энергетического спектра вертикального потока мюонов из [38], зависимость интенсивности потока мюонов от зенитного угла Θ в виде $F(\Theta) = \cos^2(\Theta)$ и ионизирующая способность мюонов в разных материалах из [39]. При этом предполагается отсутствие зависимости исходного потока от азимутального угла Φ , т. е. $F(\Phi) = \text{const}$.

В расчетах сектор обзора детектора был принят равным 90° по обоим углам, причем зенитный угол изменялся в диапазоне $0 < \Theta < 90^\circ$. Этот диапазон был разбит на 30 интервалов, что соответствует $\Delta\Phi = \Delta\Theta = 3^\circ$ и 900 направлениям траекторий мюонов. Мюоны, падающие на объект, теряют энергию по-разному, в зависимости от направления (Φ , Θ), и вследствие этого в различной степени ослабевает мюонный поток. Именно по зависимости ослабления потока от направления можно судить о распределении материала внутри объекта. В итоге результатом моделиро-

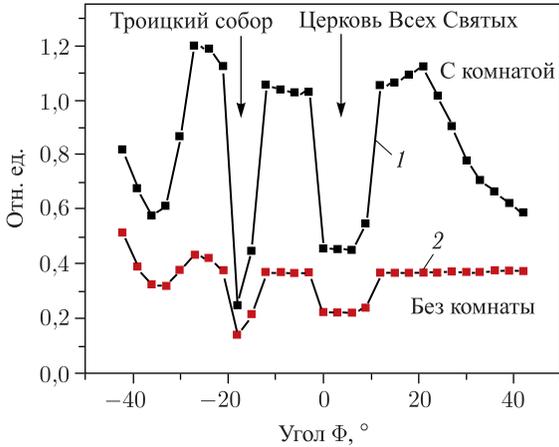


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Ожидаемое распределение потоков мюонов в детекторе 6 при наличии (черные точки, 1) и при отсутствии (красные точки, 2) подземной комнаты, полученное для фиксированного угла $\Theta = 45^\circ$

крытиями, дверями и окнами, а также окружающий грунт. Для сравнения полученных распределений при моделировании неизвестной части подвала применялись различные конфигурации перекрытий и дверей. Ниже в качестве примера приводятся результаты модельных расчетов для детекторов 16 и 17.

Распределения плотности потоков мюонов внутри объекта носят нерегулярный характер, отражающий сложную конфигурацию неизвестной части подвала. На схеме на рис. 7 показаны два возможных варианта взаимного расположения детектора 17 и части скрытой стены, имеющей

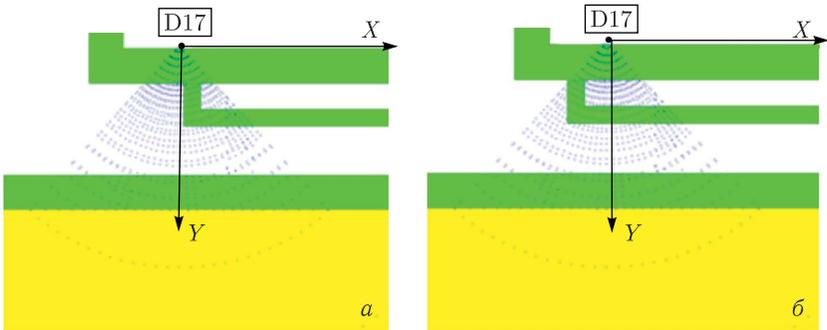


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Связанное с детектором начало координат находится напротив угла стены (а) и в стороне от него (б). Точками показаны места пересечения границ стен, перекрытий (зеленый цвет) и грунта (желтый цвет)

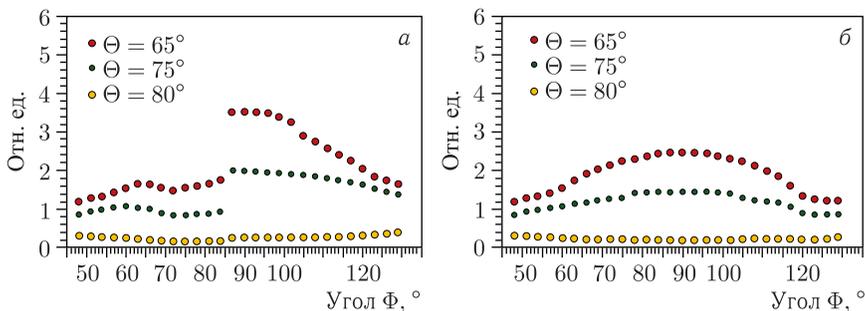


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Распределение по углу Φ числа мюонов в элементе телесного угла при трех фиксированных значениях зенитного угла: $\Theta = 65^\circ$ (красные точки), 75° (зеленые точки) и 80° (желтые точки) для двух положений детектора 17. Рис. *а* и *б* соответствуют рис. *а* и *б* на рис. 7

угол. Положение осей X и Y соответствует положению, принятому при моделировании. На рис. 8 представлены полученные распределения по углу Φ числа мюонов в элементе телесного угла для рассмотренных конфигураций в относительных единицах (как и на рис. 6).

Как видно из рис. 8, даже незначительное изменение относительного положения детектора и стены приводит к существенному изменению характера распределений. В разделе, где содержится описание экспериментальных результатов, данные, полученные детекторами 14–17, показаны аналогично рис. 8.

Для лучшего понимания, чему могут соответствовать те или иные особенности на распределениях, на рис. 9 и 10 приведены результаты моделирования числа мюонов в секторе обзора детектора 17 с учетом поглощения частиц в разных материалах (стены подвала и первого эта-

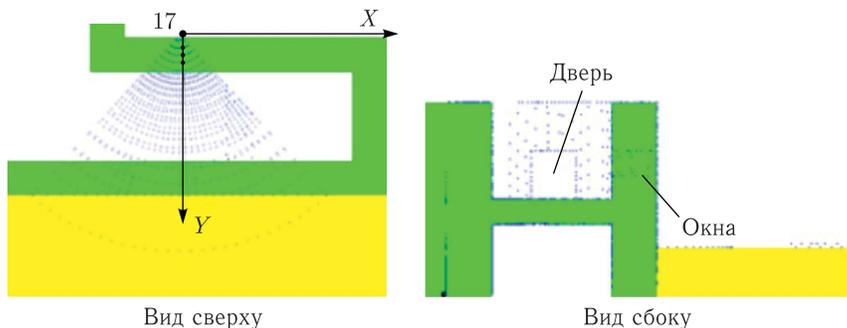


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Фрагмент моделируемого подвала в двух проекциях в секторе обзора детектора 17. Точки отмечают места пересечения траекторий и границ материалов, где зеленый цвет обозначает стены и перекрытия, желтый — грунт

жа, грунт). Сектор обзора детектора составлял 90° по углам Φ и Θ и был разбит на шаги по 3° . В процессе моделирования определялись точки пересечения лучей с границами материалов, вычислялись длины пути в каждом из них и в результате оценивалось итоговое ослабление потока. На рис. 9 показаны использованная при моделировании система координат, фрагмент подвала в двух проекциях и обозначены точки пересечения траекторий мюонов, попадающих в детектор 17, с границами материалов, через которые они прошли. На рисунке представлен случай, когда в подвале отсутствуют какие-либо дополнительные объекты в виде стен и проемов. Система координат привязана к земной поверхности.

Результатом моделирования является распределение числа частиц в элементе углов Φ и Θ в виде цветной гистограммы, представленной на рис. 10, а. На гистограмме четко видны три светлых пятна, кото-

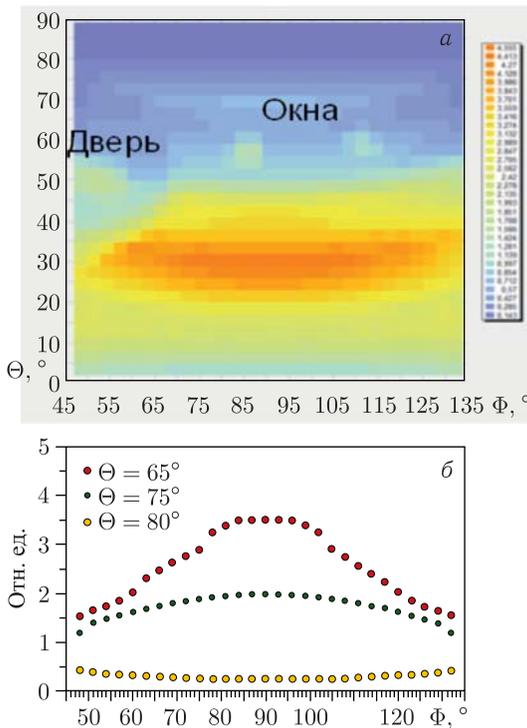


Рис. 10 (цветной в электронной версии). Результат измерения детектором 17 количества «модельных» мюонов, прошедших через изучаемый объект с разных направлений: а) двумерная гистограмма; б) зависимость от Φ при фиксированном угле Θ к вертикали $\Theta = 65^\circ$ (красные точки), 75° (зеленые точки), 80° (желтые точки)

рые соответствуют двум окнам и двери первого этажа, попадающих в сектор обзора детектора 17. Однако более наглядным является представление данных в зависимости от угла Φ при фиксированном угле Θ (рис. 10, б).

Из результатов, представленных на рис. 10, б, видно, что при отсутствии каких-либо дополнительных объектов распределение по углу Φ при фиксированном Θ является гладким, без выраженных максимумов и минимумов.

В продолжении расчетов в модель была добавлена дополнительная стена, расположенная поперек подвала, в двух вариантах — стена сплошная и стена с дверью (рис. 11, показан только вариант с дверью). На рис. 12 приведен результат «зондирования» подвала мюонами для этих двух случаев. Наблюдается значительное уменьшение числа частиц при малых углах за счет их поглощения в дополнительной стене. Добавление двери дает незначительное увеличение в области углов $\Phi \sim 55\text{--}65^\circ$, так как частицы проходят ее под углом (отмечено прямоугольником).

Еще один вариант с дополнительной стеной, расположенной на этот раз вдоль подвала, включал три положения двери по отношению к детектору. На рис. 13 показаны все три варианта модели вместе с результатами моделирования для этих случаев. Видно, что результат сильно зависит от взаимного расположения двери и детектора. В случае, когда луч, проходящий через дверь, перпендикулярен стене (рис. 13, а), наблюдается резкий выброс на распределении частиц. Однако чем больше угол

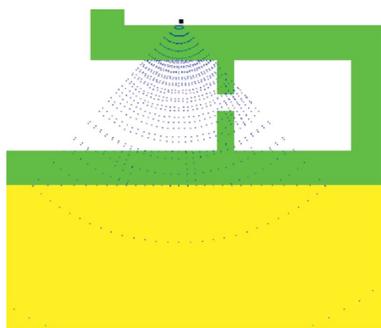


Рис. 11. Модель части подвала с детектором 17 и дополнительной стеной и дверью

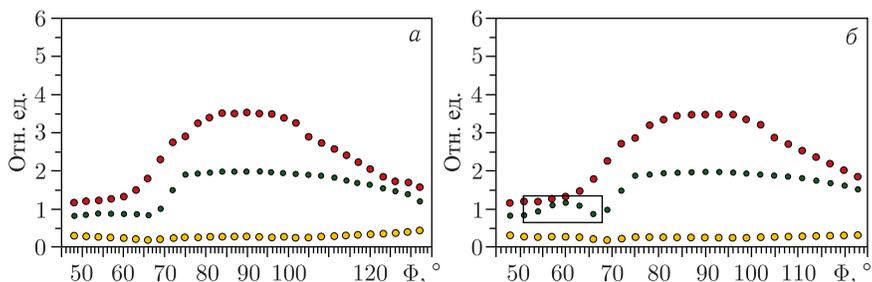


Рис. 12. Зависимость числа мюонов от угла Φ при фиксированном угле Θ (65° , 75° и 80° к вертикали): а) дополнительная стена без двери; б) стена с дверью. Прямоугольником отмечен эффект влияния двери

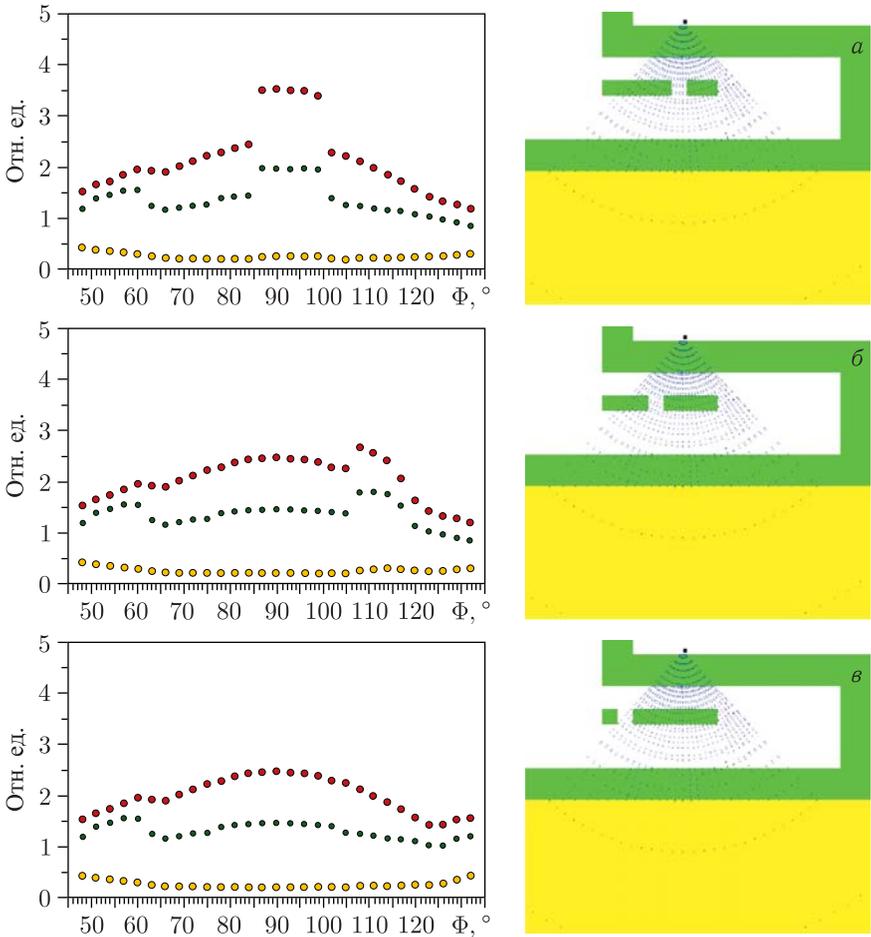


Рис. 13. Моделирование предполагаемой дополнительной продольной стены с дверью, по-разному расположенной по отношению к детектору

луча по отношению к дверному проему отклоняется от перпендикуляра (рис. 13, б, в), тем меньше выражен сигнал.

На рис. 14, а показано распределение потоков мюонов в детекторе 16 при отсутствии дополнительных объектов в подвале. Видно, что даже при пустом подвале в направлении $\Phi \sim 40^\circ$ имеется заметная нерегулярность как результат пересечения частицами стен подвала, образующих прямой угол. При добавлении продольной стены с дверью на распределении появляется только небольшой пик в области $\Phi \sim 50-60^\circ$ (рис. 14, б), так как лучи идут под небольшим углом к стене. Результат при более сложной конфигурации показан на рис. 14, в.

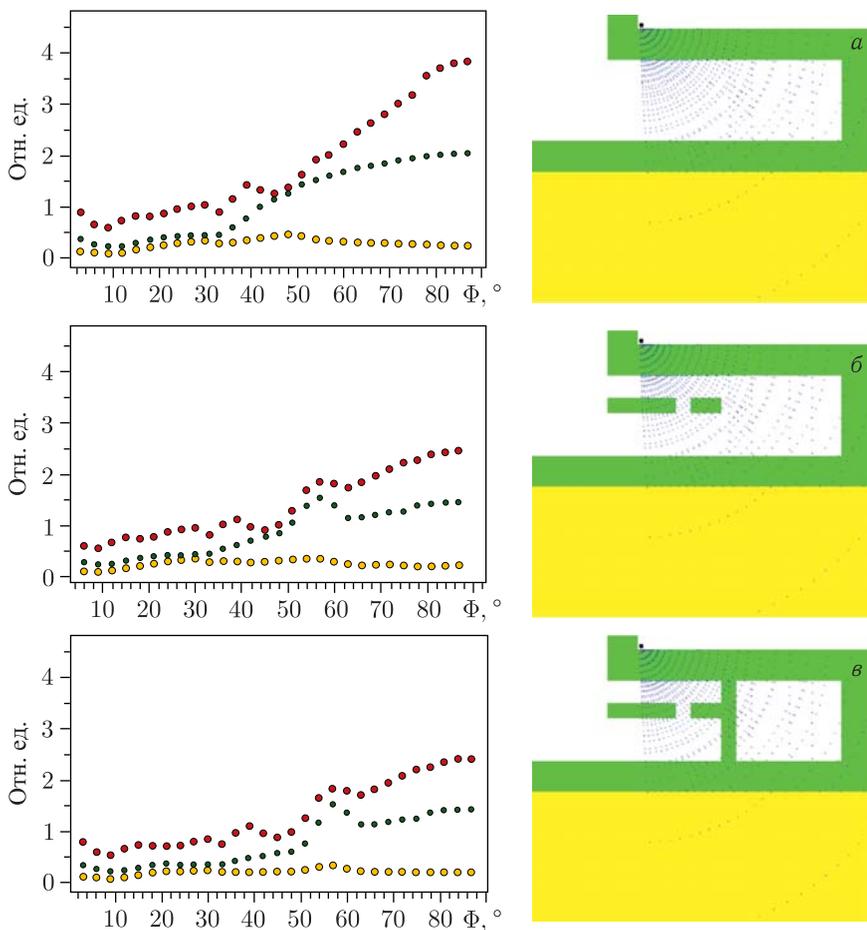


Рис. 14. Результаты моделирования для детектора 16: а) пустой подвал; б) подвал с продольной стеной и дверью; в) более сложная конфигурация

Эти и аналогичные им модельные расчеты были использованы при анализе отклика детекторов МР в реальном эксперименте.

4. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ОБЛУЧЕННЫХ ФОТОЭМУЛЬСИЙ

По окончании экспозиции в зданиях монастыря проявленные фотоэмульсии были отсканированы на микроскопах измерительного комплекса ПАВИКОМ [40]. В режиме online фиксировались координаты начала и конца каждого зарегистрированного мюонного трека. В последующую

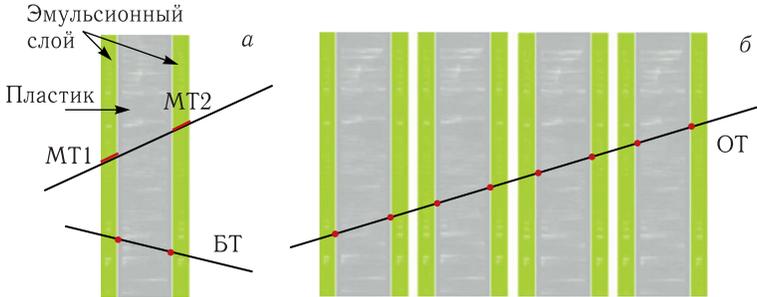


Рис. 15. Схема реконструкции трека заряженной частицы в эмульсионном детекторе: а) восстановление базового трека БТ в эмульсионной пластине на основе микротреков МТ1 и МТ2, зарегистрированных в эмульсионных слоях; б) восстановление трека ОТ в объеме детектора

обработку включались треки в диапазоне зенитных углов $\pm 45^\circ$ относительно нормали к плоскости детектора.

Обработка полученных данных осуществлялась на основе программного пакета FEDRA (Framework for Emulsion Data Reconstruction and Analysis) [41], позволяющего восстанавливать взаимное расположение эмульсионных пластин и зарегистрированных треков в объеме детектора. Реконструкция трека на основе пакета FEDRA включает несколько операций (рис. 15): фиксацию координат зарегистрированных микротреков МТ1 и МТ2 (микротрек — это фрагмент трека, зарегистрированный в одном эмульсионном слое), восстановление базового трека БТ на основе двух МТ (базовый трек — это часть трека, пересекающая оба эмульсионных слоя одной пластины) и наконец реконструкцию трека частицы в объеме детектора ОТ (объемный трек) на основе БТ. Программный алгоритм восстановления трека осуществляет привязку МТ к БТ, координатное совмещение эмульсионных пластин с использованием БТ, идентификацию ОТ и его «выравнивание» с использованием фильтра Кальмана. Более полная информация о работе программы дана в [41].

5. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для привязки эмульсионных слоев и определения координат треков была принята система координат (X_d, Y_d, Z_d) , привязанная к детектору, как показано на рис. 16: оси X_d и Z_d лежат в горизонтальной плоскости, а ось Y_d направлена вертикально вверх. Координаты треков определяются в переменных $tx = tg(\Theta_d) \cos(\Phi_d)$, $ty = tg(\Theta_d) \sin(\Phi_d)$, где Θ_d — угол к оси Z_d , а сектор «вперед» определен как положительное направление оси Z_d . Угол Φ_d отсчитывается от оси X_d в направлении оси Y_d и изменяется в интервале от 0 до 360° . Для представления результатов наиболее удобной и наглядной является система координат, привязанная к поверхности земли (X_3, Y_3, Z_3) (красные оси на рис. 16), которая может

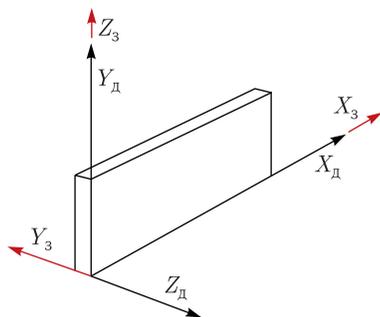


Рис. 16 (цветной в электронной версии). Взаимное расположение систем координат, связанных с детектором и с поверхностью земли

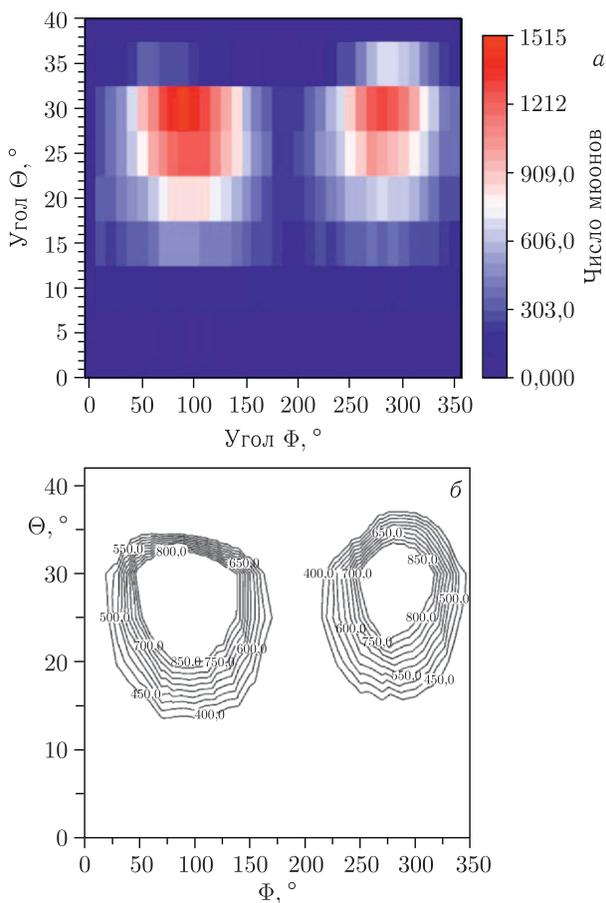


Рис. 17. Распределение числа мюонов по углам Θ и Φ : а) в виде трехмерной гистограммы; б) в виде линий уровня

быть получена из системы координат детектора поворотом на 90° вокруг оси X_d . Углы Φ_3 и Θ_3 заданы в этой системе аналогично системе детектора. Диапазон углов $\Phi_3 = 0-180^\circ$ соответствует направлению «назад», а $\Phi_3 = 180-360^\circ$ — направлению «вперед».

Результатами измерений являются угловые распределения количества мюонов в детекторе. Верхняя полусфера вокруг оси Y_d делится на элементы телесного угла, соответствующие интервалам $\Delta\Phi$ и $\Delta\Theta$ (бины), и для каждого бина производится подсчет числа зарегистрированных мюонов. Полученное распределение в виде цветной гистограммы демонстрирует различие в степени поглощения мюонов по разным направлениям, а значит, и различие в распределении материала в секторе обзора.

На рис. 17, а представлена гистограмма в системе детектора, полученная для детектора 6 с бинами $\Delta\Theta = 5^\circ$ и $\Delta\Phi = 10^\circ$. Пик в правой части гистограммы соответствует мюонам, приходящим в переднем секторе наблюдения, а пик в левой части гистограммы — мюонам, летящим сзади. Более наглядным является представление данных в виде линий уровня, использующее производные при сглаживании, а потому более чувствительное к нерегулярностям в дискретных распределениях, таких как изменения числа мюонов в соседних бинах. В этом случае дискретное распределение по числу мюонов в элементах телесного угла преобразуется в непрерывное распределение в виде поверхности, разделенной линиями уровня с фиксированным числом мюонов. Область, заключенная

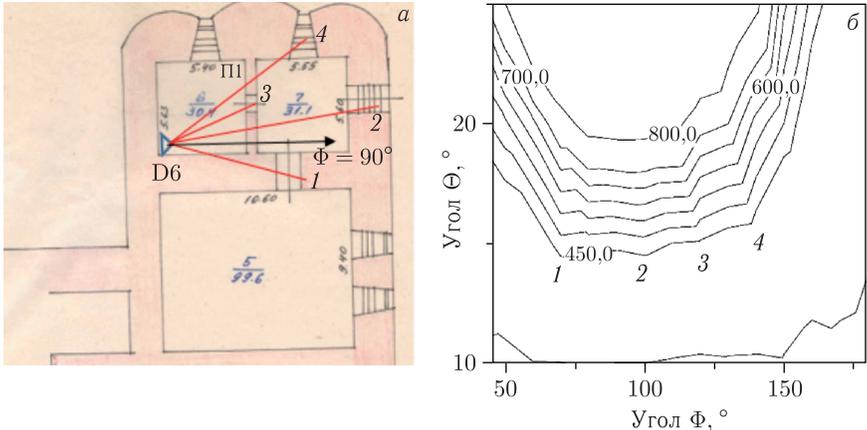


Рис. 18. а) План части подвала ЦПБМ, просматриваемой детектором 6. Указаны лучи, пересекающие элементы строения: 1 — переход из маленького подвального помещения в большое; 2 — вход в подвальные помещения ЦПБМ; 3 — переход между маленькими подвальными помещениями; 4 — окно в маленьком подвальном помещении. б) Линии уровня, полученные по данным детектора 6 для направления «назад». Небольшим локальным объектам, типа дверных или оконных проемов, соответствуют небольшие пики на линиях уровня

между линиями с числами $N1$ и $N2$ (где $N1 < N2$), соответствует бинам, в которых количество мюонов N заключено в диапазоне $N1 < N \leq N2$. На рис. 17, б результаты обработки данных детектора б представлены в виде линий уровня.

Одной из задач первого этапа эксперимента была проверка методики, а именно ее чувствительности к изменениям количества материала на пути мюонных потоков, приходящих с разных направлений. Эта проверка проводилась на видимых архитектурных элементах подвальных помещений ЦПБМ. Анализ результатов измерений показал, что использованные в работе детекторы «чувствуют» пустоты (дверные и оконные проемы, переходы между помещениями) размером от 50×50 см на фоне окружающих стен на расстоянии 10–15 м. Этот результат иллюстрируют данные

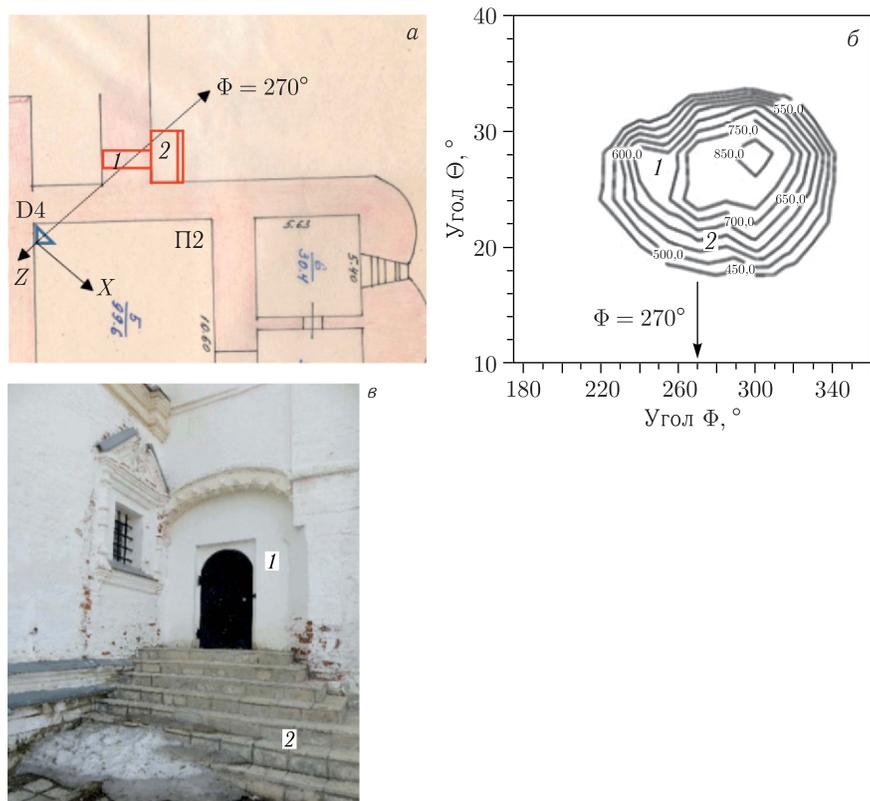


Рис. 19. Результат экспозиции детектора 4: а) схема установки детектора; б) линии уровня, полученные по данным детектора для направления «вперед» (цифрами показаны особенности распределения); в) фотография двери и массивной лестницы, «увиденных» детектором, находившимся в подвале на глубине 3 м на расстоянии примерно 7 м от комнаты за дверью (1) и лестницы (2)

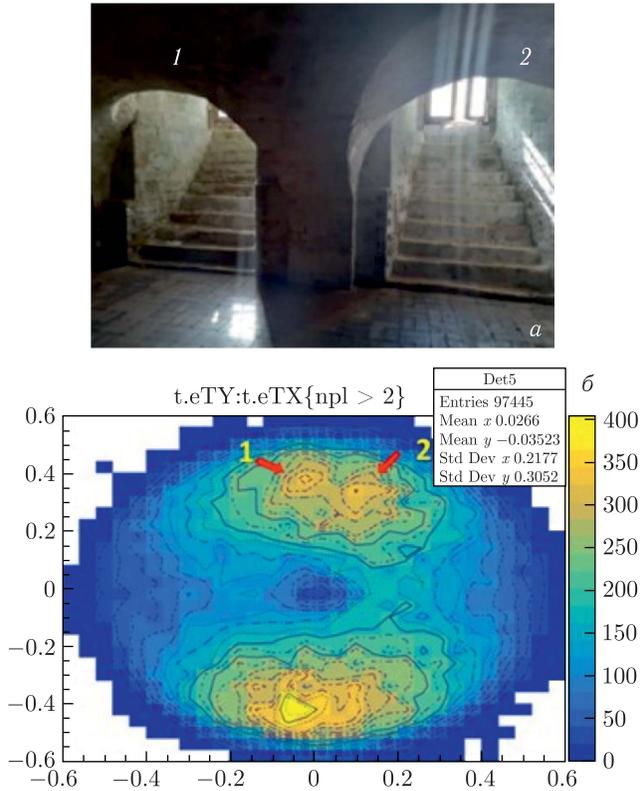


Рис. 20. Оконные проемы в подвале ЦПБМ, «увиденные» детектором 5: а) фотография оконных проемов; б) распределение потоков мюонов в переменных tx и ty , цифрами указаны сигналы от оконных проемов

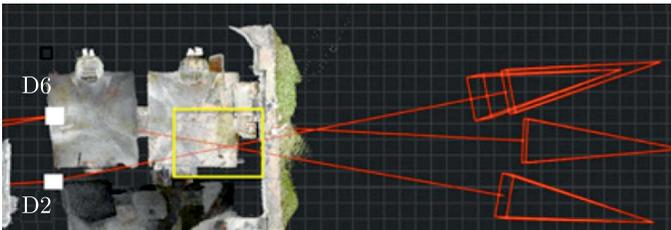


Рис. 21 (цветной в электронной версии). Компьютерная реконструкция части подвала ЦПБМ, просматриваемой детекторами 2 и 6. Область пересечения секторов обзора детекторов выделена желтым прямоугольником. Оранжевыми стрелками показаны направления максимальных потоков мюонов

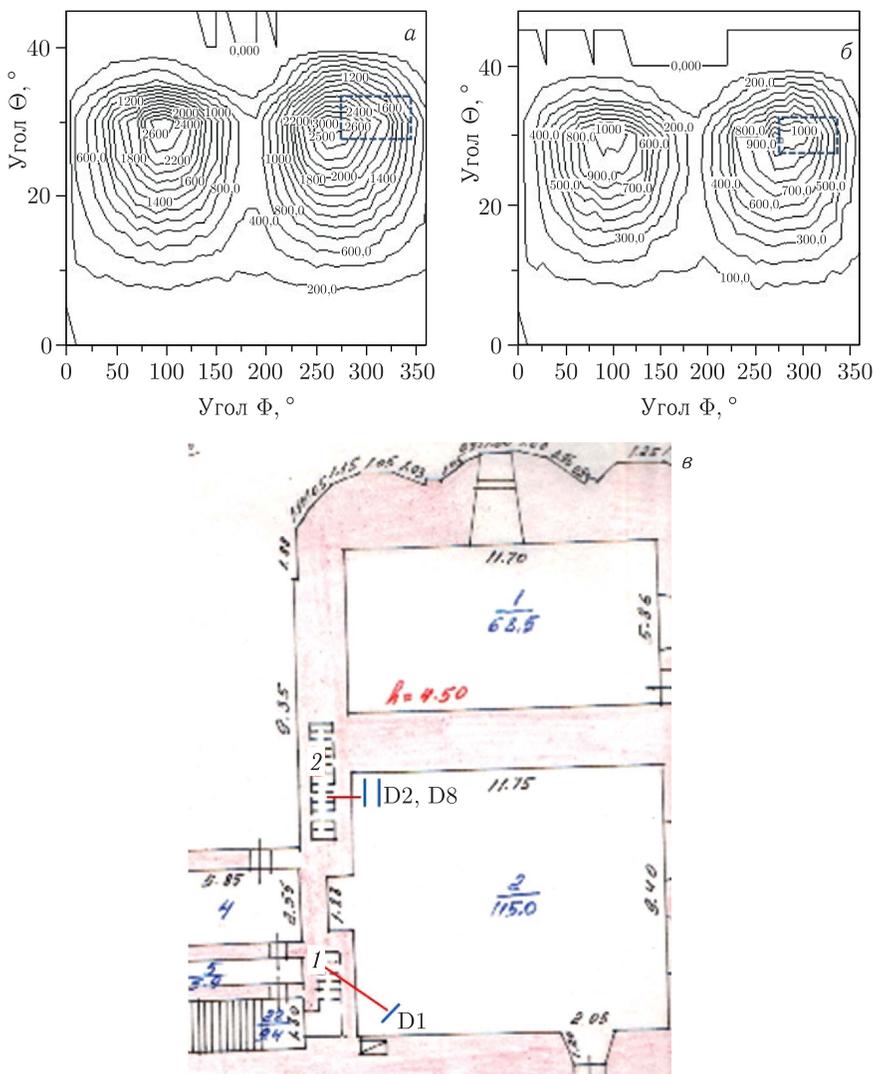


Рис. 22. Схема обнаружения воздуховодов первого этажа ЦПБМ: а) объединенные линии уровня детекторов 2 и 8; б) линии уровня детектора 1; в) положение детекторов 1, 2 и 8, установленных в подвале; зарегистрированные ими воздуховоды на уровне первого этажа обозначены цифрами 1 и 2

детектора 6, находившегося в подвале ЦПБМ (рис. 18, а). На рис. 18, б показан фрагмент распределения числа мюонов, полученного в детекторе, на котором выступы, отмеченные цифрами, соответствуют направлениям на пустоты, обозначенным теми же цифрами на рис. 18, а.

Данные других детекторов также демонстрируют соответствие между особенностями хода линий уровня и направлениями на реальные фрагменты зданий. Ниже это соответствие проиллюстрировано данными детекторов 4 (рис. 19) и 5 (рис. 20).

На рис. 20 представлен результат измерения потоков мюонов детектором 5 в направлении назад. На рис. 20, *а* цифрами 1 и 2 обозначены оконные проемы в подвале ЦПБМ, а на рис. 20, *б* приведен результат обработки данных детектора в переменных tx , ty , где эти проемы, обозначенные теми же цифрами, четко видны на гистограмме.

Еще один важный результат связан с возможностью использовать пересечения воображаемых лучей мюонов, приходящих на разные детекторы, для уточнения положения выявляемых особенностей. Один детектор дает информацию о наличии некоторой структурной особенности в направлении только своего сектора наблюдения, в то время как пересечение двух и более лучей в секторах обзора разных детекторов дает возможность оценить положение этой особенности в пространстве. На рис. 21 показан план части подвала ЦПБМ и два луча, идущие к детекторам 2 и 6 через дверной проем, соединяющий две комнаты. На гистограммах, полученных по данным детекторов, этим лучам соответствуют сигналы, свидетельствующие о наличии менее плотных областей на данных направлениях. На рис. 17, *б* эта особенность находится в направлении $\Theta \sim 24^\circ$, $\Phi \sim 270^\circ$. Заметим, что пересечение лучей находится не в самом дверном проеме, а вблизи него. Это связано с тем, что такое пересечение не является точкой, а занимает некоторую область, определяемую размером угловых бинов $\Delta\Theta = 5^\circ$, $\Delta\Phi = 10^\circ$, внутри которых регистрируются мюоны. Размер области пересечения выделен на рис. 21 желтым прямоугольником.

Пересечение лучей детекторов 1, 2 и 8 позволило выделить находящиеся на уровне первого этажа ЦПБМ известные горизонтальные полости, вероятно, воздуховоды, отмеченные прямоугольниками на рис. 22, *а*, *б*. Взаимное положение детекторов и воздуховодов показано на рис. 22, *в*.

Таким образом, регистрация методом мюонографии наблюдаемых архитектурных элементов здания ЦПБМ позволила подтвердить состоятельность этого метода с применением эмульсионных детекторов и достоверность получаемой информации.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Убедительные результаты, полученные описанным методом для видимых структурных фрагментов здания ЦПБМ, дают основание использовать его для поиска и исследования недоступных областей, таких как скрытые части подвалов, неизвестные захоронения, исторические фундаменты и т. д. С этой целью при дальнейшем анализе данных были рассмотрены попарные пересечения секторов обзора (лучей) детекто-

ров, зарегистрировавших особенности на линиях уровня (выпуклости, соответствующие менее плотным областям, или впадины, соответствующие более плотным областям). В результате были выделены области, в которых предположительно могли находиться фрагменты с аномальной плотностью.

Одна из таких областей была обнаружена на пересечении лучей детекторов 4 и 5 внутри скрытого подвала ЦПБМ (рис.23). Линии уровня для детекторов 4 и 5 показаны на рис.24. Фрагменты линий уровня, выделенные на графиках прямоугольниками, имеют сложную форму: выпуклости на них выглядят не просто как пик, как это было в случае оконных и дверных проемов, а занимают более протяженную область. Кроме того, сами эти выпуклости содержат неоднородности, в том числе небольшие пики. Все это свидетельствует о сложной кон-

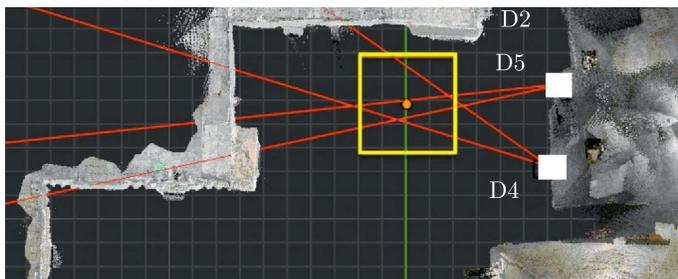


Рис. 23 (цветной в электронной версии). Пересечение лучей детекторов 4 и 5 внутри недоступной области подвалов ЦПБМ. Область пересечения выделена желтым квадратом

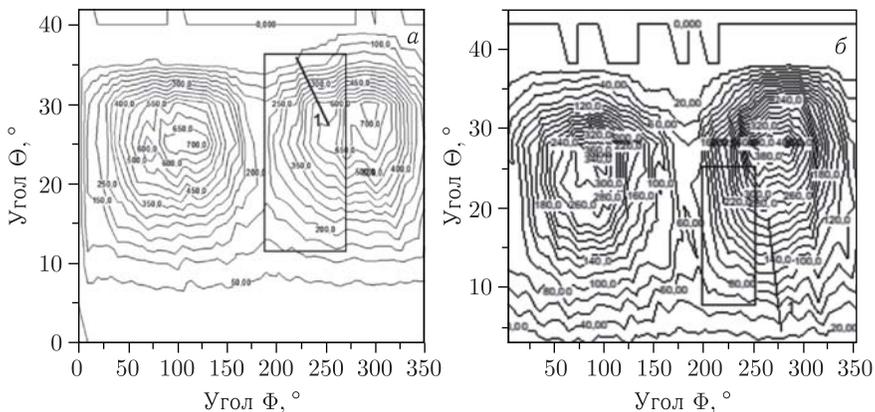


Рис. 24. Линии уровня детекторов 4 (а) и 5 (б), лучи которых пересекаются в скрытом помещении (желтый прямоугольник на рис. 23) Прямоугольниками выделены области углов, имеющие аномальное поведение на линиях уровня

фигурации архитектурных фрагментов в этом направлении, включая, возможно, дверные проемы. Следует отметить, что линии уровня в направлении «назад» на диаграммах детекторов 4 и 5 также демонстрируют сложную конфигурацию, что означает запутанную структуру помещений

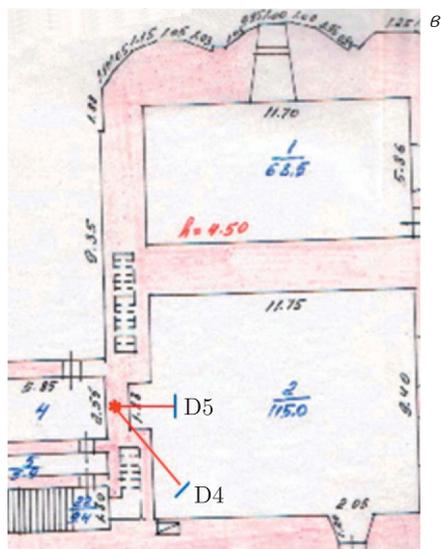
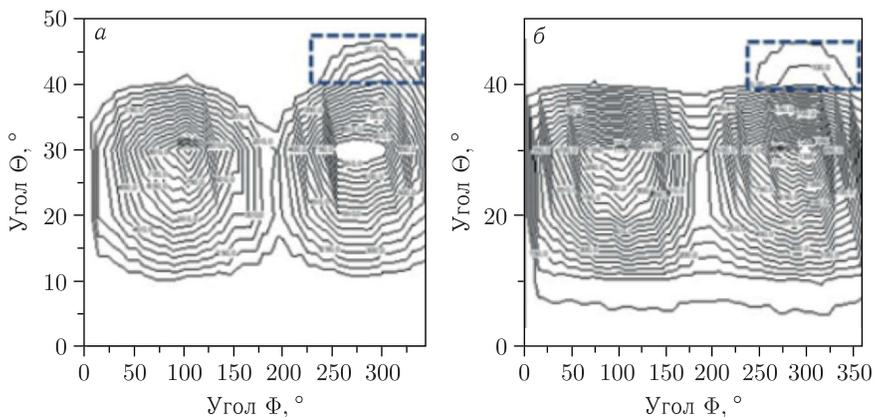


Схема БТИ 1-го этажа здания

Рис. 25. Угловые распределения при шаге линий уровня 20 частиц: а) для детектора 4; б) для детектора 5 (прямоугольником отмечен сигнал от вертикальной полости на уровне первого этажа); в) схема установки детекторов 4 и 5 в подвале ЦПБМ, «увидевших» скрытую вертикальную полость (отмечено звездочкой) на уровне первого этажа ЦПБМ

в этом направлении, включающую дверные и оконные проемы, перепады толщины стен и т. п.

В выделенных направлениях обнаружены и другие особенности. Так, заметная выпуклость на линиях уровня детектора 4 (обозначена отрезком 1 на рис. 24, а) задает направления луча, ход которого соответствует движению по горизонтали в широком диапазоне углов Φ . Это может свидетельствовать о наличии протяженного полого объекта под землей. Детектор 5 расположен напротив ниши, которая на первом этаже связана с воздуховодом, обнаруженным детекторами 1, 2 и 8 (см. рис. 22). Поведение лучей, соответствующих выпуклостям, расположенным на линии 1 на рис. 24, б ($\Phi \sim 275^\circ$), также отвечает движению по горизонтали. Возможно, детекторы 4 и 5 «видят» подземную часть воздуховода ЦПБМ.

Шаг линий уровня по зенитному углу на рис. 24 составляет 50 частиц. При уменьшении шага становится видна более тонкая структура распределений. Так, на рис. 25 при шаге линий уровня 20 частиц в направлении «вперед» появились дополнительные выступы при больших значениях угла Θ , которые отвечают объекту или объектам на первом этаже, видимо, некой скрытой вертикальной полости.

Еще одна аномалия, обнаруженная в зоне пересечения лучей детекторов 2 и 6, находится под землей между зданиями ЦПБМ и ЦВС (в области 3 на рис. 1) (рис. 26). В этом направлении хорошо просматривается лишь узкая область углов Φ в промежутке между ЦВС и Троицким собором; при остальных углах тени окружающих зданий затрудняют обзор. Область пересечения лучей детекторов в направлениях, соответствующих выступам на линиях уровня, находится под землей и может свидетельствовать о присутствии объекта с меньшей плотностью материала. Возможно, это либо древний крипт, либо часть воздуховода.

На рис. 27 показан план подвала и территории вблизи ЦПБМ, на котором выделены аномалии, обнаруженные на пересечениях лучей детекторов 2, 4, 5 и 6.

На рис. 28 представлены результаты обработки детекторов 16 и 17 из второй экспозиции в ЦПБМ. Из представленных экспериментальных распределений видно, что детекторы 16 и 17 регистрируют одни и те же структурные особенности в неизвестной части подвала ЦПБМ (с учетом того, что детектор 16 располагался под углом 45° к стене). Так, данные

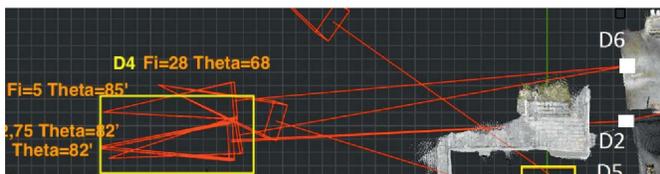


Рис. 26 (цветной в электронной версии). Пересечение лучей детекторов 2 и 6 вне зданий церквей. Область пересечения обозначена желтым прямоугольником



Рис. 27 (цветной в электронной версии). Полости, обнаруженные детекторами 2, 4, 5 и 6. а) Горизонтальная проекция подвала и части территории вблизи ЦПБМ. Найденные аномалии обозначены желтыми прямоугольниками. Точность определения центра правого прямоугольника (в подвале) ± 1 м и левого (между зданиями) $\pm 2,5$ м. б) Та же область на объемном изображении с привязкой к местности (области обнаруженных аномалий обозначены красными прямоугольниками)

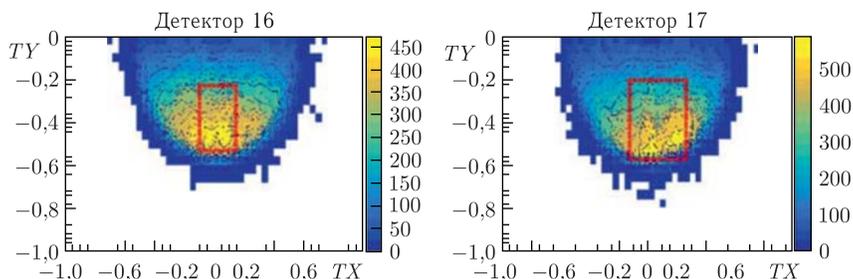


Рис. 28. Цветные трехмерные гистограммы по данным детекторов 16 и 17 в направлении пересекающихся секторов обзора. Экспериментальные результаты представлены в системах отсчета детекторов

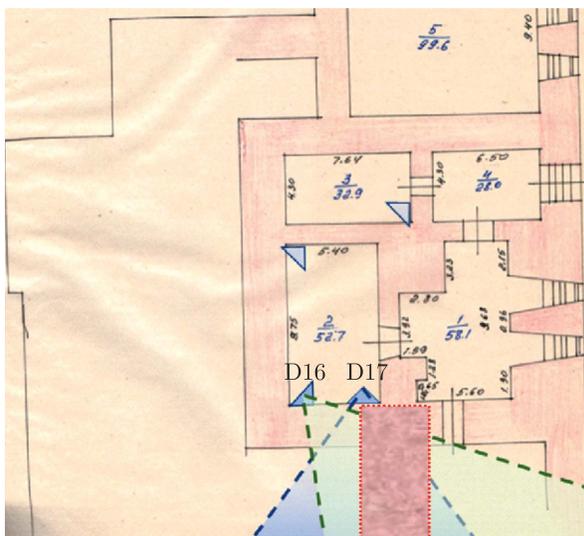


Рис. 29. Схематичное изображение полости (заштрихованный прямоугольник), обнаруженной по экспериментальным распределениям в области пересечения секторов обзора детекторов 16 и 17

детектора 17 демонстрируют максимумы в направлении $tx_{D17} = [0; 0; 0,5]$, $ty_{D17} = [-0,6; -0,2]$. Таким образом, большой диапазон углов $\Theta \approx 10\text{--}30^\circ$ вблизи $tx = 0$ указывает на то, что найденная неоднородность с пониженной плотностью находится точно напротив места установки детектора 17, а направление $tx = 0,25$ указывает на положение на 20° правее положения детектора. Данная неоднородность схематично представлена в виде заштрихованного прямоугольника на рис. 29. Сходные особенности в угловых распределениях наблюдаются и в детекторе 16 в

диапазоне $tx_{D16} = [-0,1; 0,1]$, $-ty_{D16} = [-0,55; -0,25]$, с некоторым смещением относительно детектора 17 из-за расположения под углом 45° .

Проведем сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами моделирования влияния возможных дополнительных объектов на данные детекторов (рис. 8, 11, 13 и 14).

Количество мюонов, зарегистрированных в каждом из детекторов, составляет приблизительно от 150 до 240 тыс. частиц. Это позволяет использовать более мелкие бины по углам для увеличения углового разрешения распределений. Как и при моделировании, будем использовать систему координат, связанную с поверхностью Земли, взяв шаги по углам Φ_3 и Θ_3 равными 3° . В этом случае верхняя полусфера, которая просматривается детектором, содержит 3600 бинов, хотя в реальном эксперименте сектор регистрации мюонов в несколько раз меньше. Количество зарегистрированных частиц в одном бине достигает 900, что обеспечивает хорошую статистическую надежность распределений. Для удобства восприятия далее мы будем представлять результаты в виде распределений по углу Θ , отсчитываемому от горизонтали $\Theta = 90 - \Theta_3$.

Результаты измерений можно представить в виде гистограмм, которые показывают число частиц в соответствующем бине. На рис. 30 показаны экспериментальные гистограммы в системе Земли для детектора 14, полученные в направлении «назад» (рис. 30, а) и «вперед» (рис. 30, б). Для анализа удобнее выделить из такой гистограммы точки, демонстрирующие зависимость числа частиц в бине как функцию угла Φ при фиксированном угле Θ . На рис. 31 дано распределение числа частиц по углу Φ при фиксированных значениях угла $\Theta = 25, 15$ и 10° к горизонту для детектора 14. Эти значения угла Θ обозначены горизонтальными линиями на рис. 30, а.

Ниже на рис. 32–34 показаны аналогичные распределения для тех же значений угла Θ для детекторов 15, 16 и 17 соответственно.

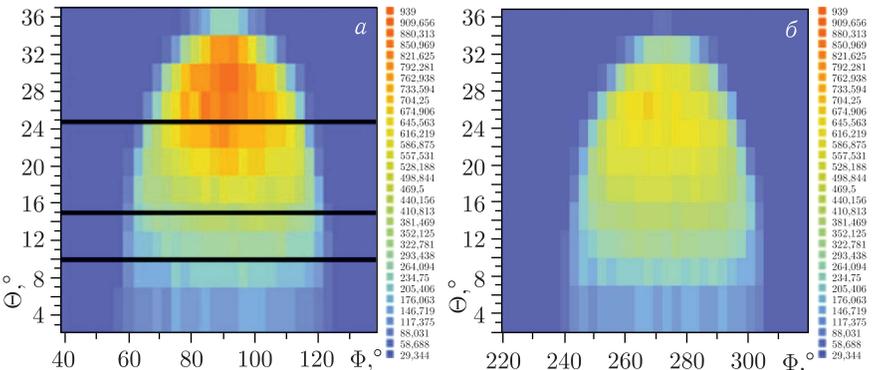


Рис. 30. Гистограмма числа зарегистрированных мюонов по данным детектора 14. Линиями показаны фиксированные значения угла $\Theta = 25, 15$ и 10° к горизонту

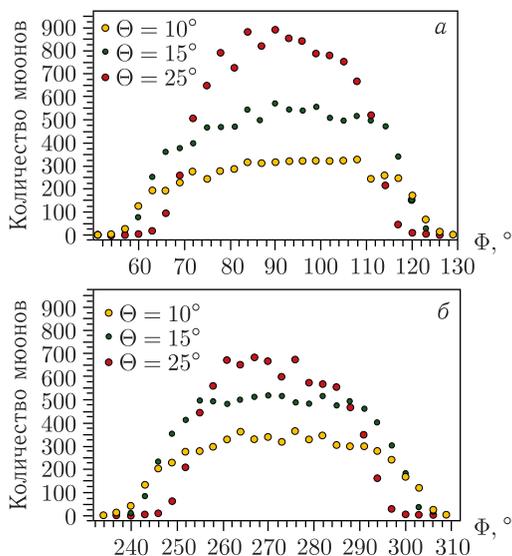


Рис. 31 (цветной в электронной версии). Зависимость числа частиц в детекторе 14 от угла Φ при фиксированных значениях угла $\Theta = 25^\circ$ (красные точки), 15° (зеленые точки) и 10° (желтые точки) к горизонту: а) направление на известную часть подвала; б) направление на неизвестную часть подвала

Особенности расположения точек на рис. 32 отражают сложную конфигурацию объектов, расположенных в подвале ЦПБМ. Следует отметить некоторое «подобие» распределений при разных углах Θ , что может означать, что эти неровности распределений не являются случайными флуктуациями, а отражают реальные неоднородности материала на пути мюонов. Так, на рис. 32, а в диапазоне углов $\Phi = 80\text{--}85^\circ$ четко видна особенность, характерная для проема, рассматриваемого под углом к стене, отличным от 90° . Этот диапазон углов соответствует известной части подвала, где в этом направлении, действительно, имеются проемы, дверные и оконные.

На рис. 33 приведены зависимости числа мюонов от угла Φ при фиксированных значениях угла Θ для детектора 16. На рис. 33, а, так же как на рис. 32, а, но менее четко, выделяется область в диапазоне углов $85\text{--}95^\circ$, характерная для проема под углом к стене, отличным от 90° . На рис. 33, б для угла $\Theta = 25^\circ$ также выделяется диапазон углов $\Phi = 265\text{--}275^\circ$, соответствующий области меньшей плотности.

На рис. 34 представлены зависимости числа мюонов от угла Φ при фиксированных значениях угла Θ для детектора 17. На рис. 34, а довольно четко выделяется область в районе углов $\Phi = 75^\circ$, характерная для проема под углом к стене, отличным от 90° . Помимо этого, у распределений на рис. 31–34 наблюдается ряд особенностей, свидетельствующих

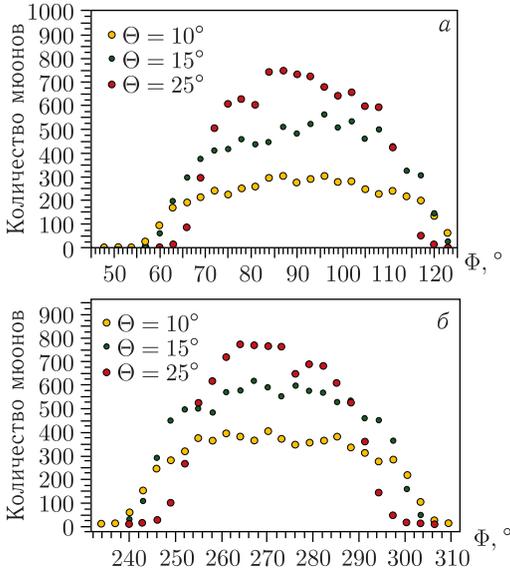


Рис. 32 (цветной в электронной версии). Зависимость числа мюонов в детекторе 15 от угла Φ при фиксированных значениях угла $\Theta = 25^\circ$ (красные точки), 15° (зеленые точки) и 10° (желтые точки) к горизонту: а) направление на известную часть подвала; б) направление на неизвестную часть подвала

о чередовании более и менее плотных объектов, возможно стен и проемов в данной области.

Приведенные данные позволяют проанализировать количество частиц, зарегистрированных детекторами в разных направлениях. Во-первых, наблюдается существенное различие в числе частиц, зарегистрированных детектором 16 в направлениях «вперед» (~ 700 частиц) и «назад» (~ 900 частиц). Это может означать, что в длинной части неизвестного подвала (направление «вперед») содержится намного больше материала, чем в короткой (направление «назад»), или он большей плотности. Этот вывод подтверждается распределениями, полученными по данным детектора 17, который тоже просматривает короткую часть подвала (см. рис. 34, а) и где также было зарегистрировано около 900 частиц. Кроме того, этот результат подтверждает сделанный ранее вывод о наличии пустого пространства в короткой части неизвестного подвала. В то же время на распределениях, полученных по данным детектора 17 в направлении известной части подвала (см. рис. 34, а), число частиц также достигает 850–900. Возможно, это означает, что эта часть подвала оснащена перегородками не больше, чем неизвестная, за исключением направления $\Phi \sim 90^\circ$, в котором зарегистрированные мюоны проходят вдоль длинной стены, и на распределении имеется скачок, аналогич-

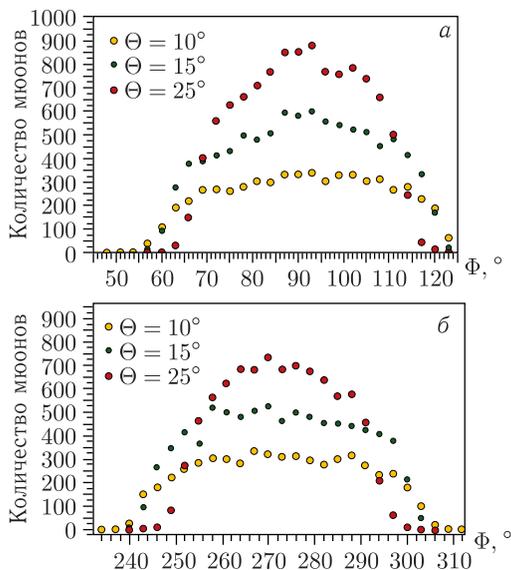


Рис. 33 (цветной в электронной версии). Зависимость числа мюонов от угла Φ при фиксированных значениях угла $\Theta = 25^\circ$ (красные точки), 15° (зеленые точки) и 10° (желтые точки) к горизонту для детектора 16: а) направление на короткий участок неизвестной части подвала; б) направление на длинную часть подвала

ный полученному в модельных расчетах (см. рис. 13). Кроме того, на распределении для детектора 16 (см. рис. 33, а) наблюдается скачок в области $\Phi \sim 85\text{--}95^\circ$, аналогичный полученному путем моделирования для случая, представленного на рис. 13, а. Это может свидетельствовать о наличии двери или угла в секторе обзора детектора, возможно, на первом этаже здания ЦПБМ.

Детекторы 15 и 16 просматривают длинную область неизвестной части подвала ЦПБМ (см. рис. 32 и 33). Для обоих детекторов это направление «вперед», т. е. диапазон углов Φ составляет от 180 до 360° . Как и в случае детектора 16, в этой области углов детектор 15 зарегистрировал не более $700\text{--}750$ частиц, что подтверждает наличие большого количества материала по сравнению с другими областями, где число зарегистрированных частиц достигает $850\text{--}900$. Возможно, это влияние Троицкой церкви, расположенной поблизости в этом направлении. Кроме того, в распределениях наблюдаются нерегулярности, отражающие наличие сложной системы поглотителей, таких как пересечения стен, углов, проемов и т. п. Так, в направлении $\Phi \sim 275^\circ$ имеется резкий скачок в обоих распределениях, а при $\Phi \sim 265^\circ$ — небольшая нерегулярность.

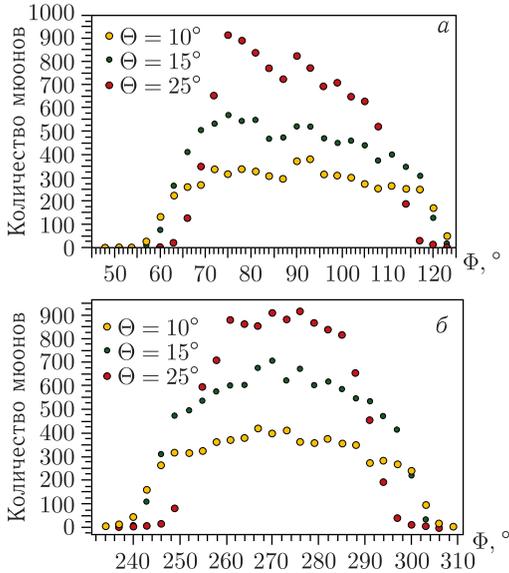


Рис. 34 (цветной в электронной версии). Зависимость числа мюонов от угла Φ при фиксированных значениях угла $\Theta = 25^\circ$ (красные точки), 15° (зеленые точки) и 10° (желтые точки) к горизонту для детектора 17: а) направление на известную часть подвала; б) направление на неизвестную часть подвала

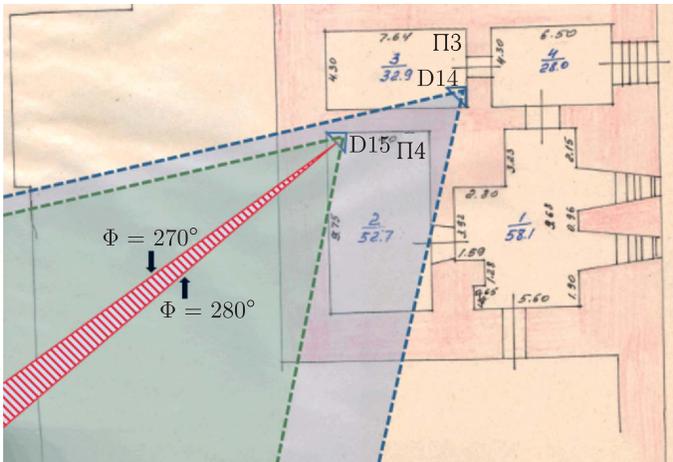


Рис. 35. Пересечение секторов обзора для детекторов 14 и 15

Сравнение распределений, полученных в детекторах 14 и 15, ориентированных в одну и ту же сторону, показывает, что эти распределения очень схожи, особенно в той части, которая направлена на неизвестную

часть подвала ЦПБМ. Пересечение секторов обзора детекторов показано на рис. 35.

На экспериментальных распределениях в координатах tx , ty , полученных в выделенных секторах обзора детекторов 14 и 15, не выявлено никаких выраженных изменений плотности зарегистрированного потока мюонов. Однако на распределениях от угла Φ при фиксированных значениях $\Theta = 25, 15$ и 10° наблюдаются небольшие особенности (см. рис. 31 и 32), а именно провалы в области $\Phi = 275-280^\circ$ (заштрихованная область углов на рис. 35), т.е. мюоны встречаются в этом направлении более плотную среду (стена, перекрытие и т.п.).

Детекторы 13 и 18 были установлены в подвальном помещении ЦВС последовательно во времени, но с одним и тем же периодом экспозиции около 2,5 мес. Оба детектора располагались приблизительно в одном и том же месте, схема их расположения представлена на рис. 36. Так как оба детектора использовались для наблюдения в одном и том же направлении в идентичных условиях, то зарегистрированные ими особенности свидетельствуют о реальном присутствии скрытых структур в этом направлении. Экспериментальные распределения числа мюонов в детекторах 13 и 18 в переменных tx , ty представлены на рис. 37.

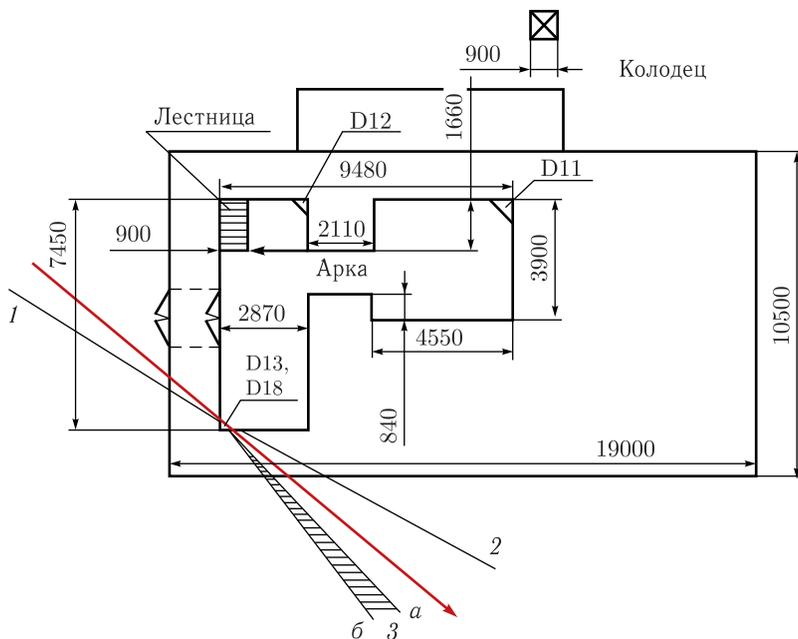


Рис. 36. Схема расположения детекторов 11, 12, 13 и 18 в подвальном помещении ЦВС. Прямые 1, 2 и 3 указывают в направлении обнаруженных особенностей потоков мюонов

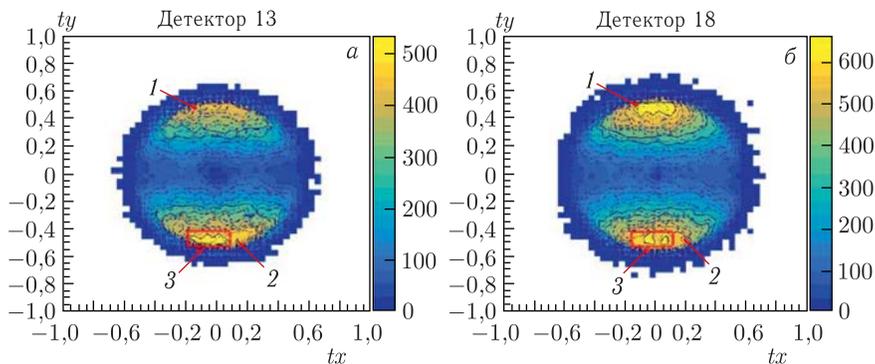


Рис. 37. Экспериментальное угловое распределение мюонов в детекторах 13 и 18, экспонированных в здании ЦВС. Цветовая шкала на гистограмме обозначает число зарегистрированных мюонов в одном бине. Значения переменных по оси ординат $ty > 0$ соответствуют направлению «назад» (верхняя полусфера), а $ty < 0$ — направлению «вперед»

Основная часть широких пиков в области $tx = 0$, $ty = \pm 0,5$ соответствует естественному распределению потоков мюонов в данном диапазоне углов ($\Theta < 45^\circ$). Однако на этом фоне присутствуют дополнительные локальные максимумы (обозначенные цифрами 1, 2 и 3 на рис. 37), где 1 — неоднородность в направлении «назад» при $tx = -0,1$; $ty = 0,45$; 2 — неоднородность в направлении «вперед» при $tx = 0,18$; $ty = -0,5$; 3 — широкая неоднородность в направлении «вперед» при $tx = (-0,2; 0,1)$; $ty = -0,5$.

Наличие этих неоднородностей в распределениях указывает на то, что в соответствующих направлениях присутствуют области с меньшей поглощающей способностью. Учитывая, что значения переменной $ty = \pm 0,5$ соответствуют углу к горизонту порядка $20\text{--}25^\circ$, эти особенностипадают на расстоянии не более 7–8 м от положения детектора.

Рассмотрим каждую из обнаруженных особенностей в отдельности.

Максимум под номером 1 в направлении «назад» может соответствовать объекту небольшого размера — полости или области с плотностью, меньшей по сравнению с основной частью материала.

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

Области вблизи направления $tx = 0$ соответствуют естественному максимуму потока мюонов при фиксированном значении ty и в первом приближении должны быть одинаковы в направлениях «вперед» и «назад». Однако в направлении «вперед» при $ty = -0,5$ видна протяженная неоднородность, обозначенная цифрой 3, намного превышающая естественный фон. Ее угловой размер указывает на крупную аномалию,

масштаб которой, определяемый расстоянием до детектора, может быть оценен по величине сектора $a-b$ на рис. 36.

Детекторы 18 и 19 были установлены вдоль одной из стен в подвальном помещении ЦВС, схема их расположения и пересечения секторов обзора показана на рис. 38. Время экспозиции составило около 2,5 мес.

На рис. 39 представлена зависимость числа частиц в бинах от угла Φ при фиксированных значениях угла $\Theta = 3, 6, 9, 12, 15$ и 18° (снизу вверх) для детекторов 18 и 19 в направлении, выделенном на рис. 38.

Особенностью представленных распределений является наличие четких перегибов при значениях $\Theta = 12$ и 15° в области углов $\Phi \sim 255-260^\circ$ (до и после ход точек довольно гладкий), что говорит о пересечении потоком мюонов протяженного объекта, имеющего локальную неоднородность, например стен, идущих под прямым углом друг к другу. Можно предположить, что указанные перегибы в распределении свидетельствуют о пересечении частицами протяженного полого подземного объекта

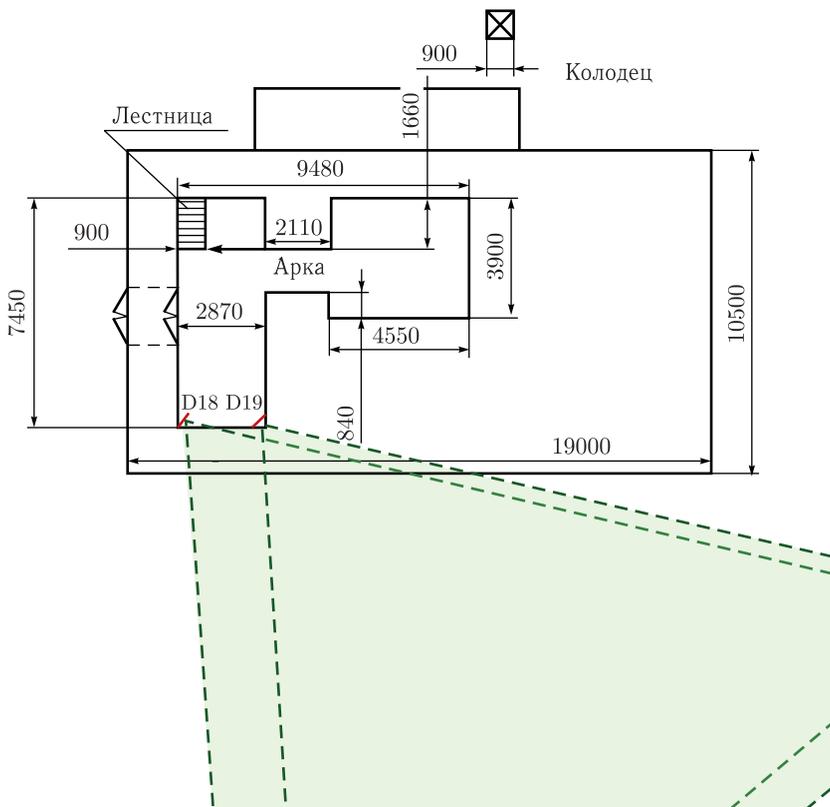


Рис. 38. Схема пересечения секторов обзора детекторов 18 и 19

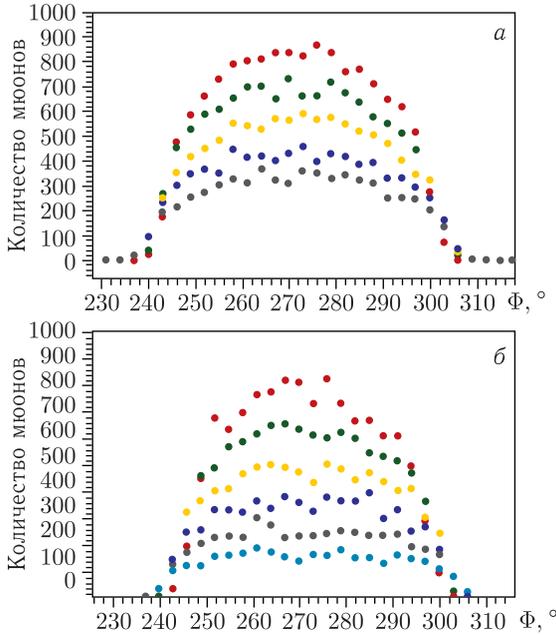


Рис. 39. Зависимость числа частиц в бинах от угла Φ при фиксированных углах $\Theta = 3, 6, 9, 12, 15$ и 18° (снизу вверх) к горизонту для детекторов 18 (а) и 19 (б)

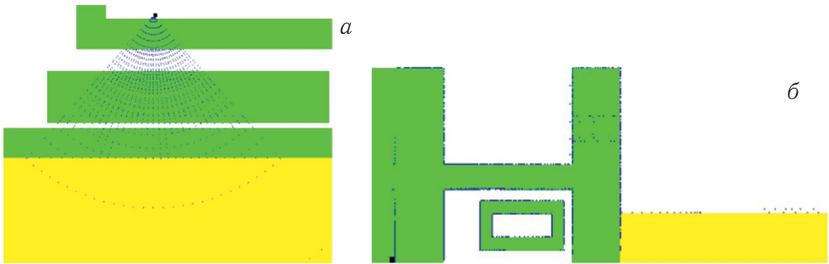


Рис. 40. Вертикальная (а) и горизонтальная (б) проекции модели подземной камеры прямоугольной формы для расчета отклика детектора

со стенами более плотными (камень), чем окружающее пространство (грунт).

Чтобы проверить это предположение, было проведено дополнительное моделирование облучения мюонами подземной камеры прямоугольной формы, горизонтальная и вертикальная проекции которой показаны на рис. 40. Распределения числа частиц в бине при углах $\Theta = 6, 9, 12, 15$ и 18° для такого объекта показаны на рис. 41, где видны характерные перегибы в направлении $\Theta > 6^\circ$ и $\Phi \sim 60-75^\circ$. В модели они являются

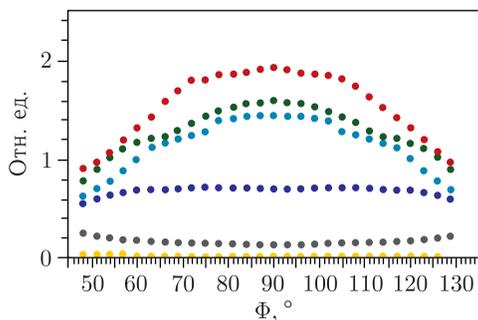


Рис. 41. Зависимость числа частиц от угла Φ при фиксированных значениях угла $\Theta = 6, 9, 12, 15$ и 18° к горизонту, полученная в результате модельных расчетов

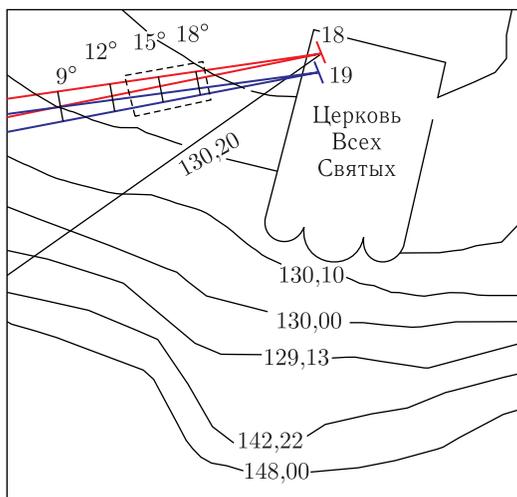


Рис. 42 (цветной в электронной версии). Часть территории монастыря с ЦВС с указанием уровня высот. Цветные линии — направления от детекторов 18 и 19 при $\Phi = 12$ и 15° , при которых наблюдаются изломы на распределениях мюонов

результатом пересечения лучами стен, идущих под прямым углом друг другу. Форма и положение этих особенностей зависят от взаимного положения детектора и камеры.

Сравнение особенностей на экспериментальных и смоделированных распределениях позволяет предположить, что в секторах обзора детекторов 18 и 19 находится протяженный полый объект, на сигнал от которого накладываются «тени» от локальных неоднородностей.

На рис. 42 показан план части территории монастыря вокруг церкви Всех Святых. На план нанесены линии, соответствующие направлениям по углу $\Phi = 12$ и 15° , при которых наблюдаются изломы на распределе-

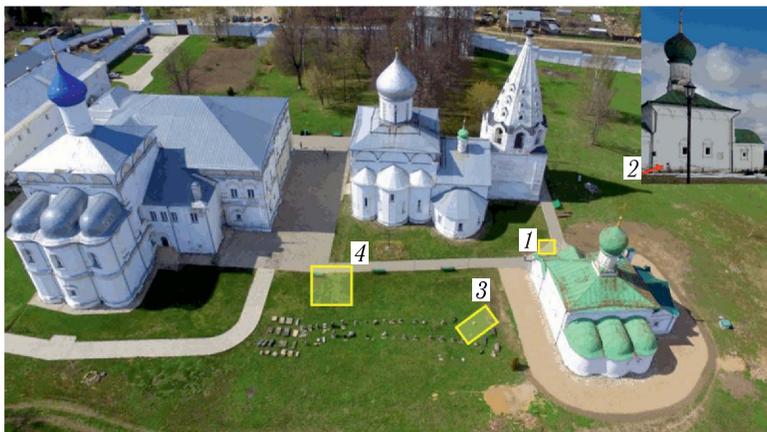


Рис. 43 (цветной в электронной версии). Фотография территории монастыря с указанием областей (желтые прямоугольники), где методом мюнографии обнаружены скрытые под землей ранее неизвестные полости

ниях мюонов, зарегистрированных детекторами 18 (красные линии) и 19 (синие линии).

То, что при других значениях угла Φ особенности в распределениях не наблюдаются, означает, что частицы, падающие под этими углами, проходят выше или ниже возможного объекта. На рис. 42 отрезками отмечены места выхода мюонов из грунта, выходящих под разными углами Θ из грунта на склоне. Места пересечения лучами объекта при этом находятся под землей на глубине порядка 1–1,5 м. Следовательно, можно предположить, что объект располагается в области, отмеченной на рис. 42 штриховым прямоугольником.

На фотографии территории монастыря (рис. 43) местоположения полостей, зарегистрированных в данном эксперименте, обозначены желтыми прямоугольниками. Область под номером 1 соответствует объекту небольшого размера — полость или область с плотностью, меньшей чем основная часть материала (грунт, стены). Область под номером 2 с большой долей вероятности соответствует дверному проему, ведущему в келью между подвалом и первым этажом ЦВС — показан на вставке справа сверху. Область под номером 3 — широкая неоднородность, соответствующая полости на глубине порядка 1–1,5 м. Максимум под номером 4 — большая полость, обнаруженная с точностью $\pm 2,5$ м (она же показана на рис. 27).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом мюнографии проведен эксперимент по исследованию зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря в г. Переславле-Залесском с целью поиска скрытых фрагментов древних строений,

пустот в стенах и под землей. Инновационный неинвазивный метод мюнографии, использованный авторами, позволяет осуществлять исследование внутренней структуры различных объектов, в частности историко-археологических. Эксперимент проводился с использованием эмульсионных трековых детекторов, ядерные фотоэмульсии для которых были произведены в России на предприятии ООО «АВК Славич» в г. Переславле-Залесском. Работа проводилась на двух зданиях монастыря — церкви Похвалы Божьей Матери и церкви Всех Святых и участке территории между ними. В статье дается описание основ метода, подробностей проведения эксперимента, алгоритма обработки данных и анализ полученных результатов.

На основе полученных угловых распределений потоков мюонов для известных архитектурных элементов была убедительно продемонстрирована состоятельность выбранных технических решений и достоверность полученных результатов.

В замураванной части подвалов ЦПБМ были обнаружены две пустые комнаты и значительное уплотнение (стены, перегородки) по направлению к главному входу в монастырь. Обнаружен неизвестный воздуховод на уровне первого этажа ЦПБМ. На территории монастыря между зданиями ЦПБМ и ЦВС выявлены три полости, происхождение и назначение которых может представлять большой интерес для дальнейших археологических изысканий (древние крипты? воздуховоды?).

Важным результатом представленной работы является тот факт, что в России существует отлаженная и финансово доступная технология, позволяющая обнаруживать и исследовать внутренние структурные особенности крупных объектов искусственного и естественного происхождения без их разрушения. Авторские методические подходы и технические решения с использованием эмульсионных трековых детекторов, а также полученные экспериментальные результаты имеют огромное значение с точки зрения дальнейших внедренческих перспектив эффективного, экономичного и экологически безопасного метода мюнографии в областях археологии, геологии, ядерной энергетики, вулканологии, дефектоскопии и др. Метод представляет большой интерес для изучения и сохранения объектов культурного наследия и создания систем мониторинга проблемных объектов для минимизации последствий возможных природных и техногенных катастроф для населения, инфраструктуры и окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borozdin K., Hogan G., Morris C., William C., Priedhorsky W. C., Saunders A., Larry J., Schultz L. J., Teasdale M. E. Radiographic Imaging with Cosmic-Ray Muons // *Nature*. 2003. V. 422. P. 277.
2. Gómez H., Gibert D., Goy C., Jourde K., Karyotakis Y., Katsanevas S., Marteau J., Rosas-Carbajal M., Tonazzo A. Forward Scattering Effects on Muon Imaging // *J. Instrum.* 2017. V. 12. P. 12018.

3. Aleksandrov A. B., Vladymyrov M. S., Galkin V. I., Goncharova L. A., Grachev V. M., Vasina S. G., Konovalova N. S., Malovichko A. A., Managadze A. K., Okat'eva N. M., Polukhina N. G., Roganova T. M., Starkov N. I., Tioukov V. E., Chernyavsky M. M., Shchedrina T. V. Muon Radiography Method for Fundamental and Applied Research // *Phys. Usp.* 2017. V. 60. P. 1277–1293.
4. Procureur S. Muon Imaging: Principles, Technologies and Applications // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2018. V. 878. P. 169–179.
5. Bugaev E. V., Misaki A., Naumov V. A., Sinegovskaya T. S., Sinegovsky S. I., Takahashi N. Atmospheric Muon Flux at Sea Level, Underground and Underwater // *Phys. Rev. D.* 1998. V. 58. P. 054001.
6. Aglietta M. et al. (LVD Collab.). Study of Single Muons with the Large Volume Detector at Gran Sasso Laboratory // *Phys. At. Nucl.* 2003. V. 66. P. 123–129.
7. Zyla P. A. et al. (Particle Data Group). 2020 Review of Particle Physics // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2020. V. 2020. P. 083C01.
8. Oláh L., Barnaföldi G. G., Hamar G., Melegh H. G., Surányi G., Varga D. Cosmic Muon Detection for Geophysical Applications // *Adv. High Energy Phys.* 2013. V. 2013. P. 560192.
9. Jourde K., Gibert D., Marteau J., de Bremond d'Arès J., Komorowski J.-C. Muon Dynamic Radiography of Density Changes Induced by Hydrothermal Activity at the La Soufrière of Guadeloupe Volcano // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 33406.
10. Tanaka H. K. M. Visualization of the Internal Structure of Volcanoes with Cosmic-Ray Muons // *J. Phys. Soc. Jpn.* 2016. V. 85, No. 9. P. 091016.
11. Nishiyama R., Ariga A., Ariga T., Käser S., Lechmann A., Mair D., Scampoli P., Vladymyrov M., Ereditato A., Schlunegger F. First Measurement of Ice-Bedrock Interface of Alpine Glaciers by Cosmic Muon Radiography // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44, No. 12. P. 6244–6251.
12. Tioukov V., Alexandrov A., Bozza C., Consiglio L., D'Ambrosio N., De Lellis G., De Sio C., Giudicepietro F., Macedonio G., Miyamoto S., Nishiyama R., Orazi M., Peluso R., Sheshukov A., Sirignano C., Stellacci S. M., Strolin P., Tanaka H. K. M. First Muography of Stromboli Volcano // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 6695.
13. Kedar S., Tanaka H. K. M., Naudet C. J., Jones C. E., Plaut J. P., Webb F. H. Muon Radiography for Exploration of Mars Geology // *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 2013. V. 2. P. 157–164.
14. Alvarez L. W., Anderson J. A., El Bedwei F., Burkhard J., Fakhry A., Girgis A., Goneid A., Hassam F., Iverson D., Lynch G., Miligy Z., Moussa A. H., Sharikawi M., Yazolino L. Search for Hidden Chambers in the Pyramids // *Science.* 1970. V. 167. P. 832–839.
15. Morishima K., Kuno M., Nishio A., Kitagawa N., Manabe Y., Moto M., Takasaki F., Fujii H., Satoh K., Kodama H., Hayashi K., Odaka Sh., Procureur S., Attié D., Bouteille S., Calvet D., Filosa Ch., Magnier P., Mandjavidze I., Riallot M., Marini B., Gable P., Date Y., Sugiura M., Elshayeb Y., Elnady T., Ezzy M., Guerriero E., Steiger V., Serikoff N., Mouret J.-B., Charlés B., Helal H., Tayoubi M. Discovery of a Big Void in Khufu's Pyramid by Observation of Cosmic-Ray Muons // *Nature.* 2017. V. 552. P. 386–390.
16. Saracino G., Amato L., Ambrosino F., Antonucci G., Bonechi L., Cimmino L., Consiglio L., Alessandro R. D., De Luzio E., Minin G., Noli P., Scognamiglio L., Strolin P., Varriale A. Imaging of Underground Cavities with

- Cosmic-Ray Muons from Observations at Mt. Echia (Naples) // *Sci. Rep.* 2017. V.7. P. 1181.
17. *Gilboy W.B., Jenneson P.M., Simons S.J.R., Stanley S.J., Rhodes D.* Muon Radiography of Large Industrial Structures // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2007. V. 263. P. 317–319.
 18. *Durham J.M., Guardincerri E., Morris C.L., Bacon J., Fabritius J., Fellows S., Poulson D., Plaud-Ramos K., Renshaw J.* Tests of Cosmic Ray Radiography for Power Industry Applications // *AIP Adv.* 2015. V. 5. P. 067111.
 19. *Bryman D.A., Bueno J., Jansen J.* Blind Test of Muon Geotomography for Mineral Exploration // *ASEG Extended Abstr.* 2015. V. 2015, No. 1. P. 1–3.
 20. *Bonneville A., Kouzes R., Yamaoka J., Lintereur A., Flygare J., Varner G.S., Mostafanezhad I., Guardincerri E., Rowe C., Mellors R.* Borehole Muography of Subsurface Reservoirs // *Philos. Trans. Roy. Soc. A.* 2019. V. 377. P. 20180060.
 21. *Zhang Z.-X., Enqvist T., Holma M., Kuusiniemi P.* Muography and Its Potential Applications to Mining and Rock Engineering // *Rock Mech. Rock Eng.* 2020. V. 53, No. 4. P. 4893–4907.
 22. *Borozdin K., Greene S., Lukić Z., Milner E., Miyadera H., Morris C., Perry J.* Cosmic Ray Radiography of the Damaged Cores of the Fukushima Reactors // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 109, No. 15. P. 152501.
 23. *Morishima K.* Cosmic-Ray Imaging of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant // *J. Soc. Photograph. Sci. Tech. Japan.* 2016. V. 79. P. 42–47.
 24. *Fujii H., Hara K., Hayashi K., Kakuno H., Kodama H., Nagamine K., Sato K., Kim Sh.-H., Suzuki A., Sumiyoshi T., Takahashi K., Takasaki F., Tanaka Sh., Yamashita S.* Investigation of the Unit-1 Nuclear Reactor of Fukushima Daiichi by Cosmic Muon Radiography // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2020. V. 2020. P. 043C02.
 25. *Fujii H., Hara K., Hayashi K., Kakuno H., Kodama H., Nagamine K., Sato K., Kim Sh.-H., Suzuki A., Sumiyoshi T., Takahashi K., Takasaki F., Tanaka Sh., Yamashita S.* Investigation of the Status of Unit 2 Nuclear Reactor of the Fukushima Daiichi by Cosmic Muon Radiography // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2021. V. 2021. P. 023C01.
 26. *Nagamine K., Fujimaki T., Hashimoto T., Tsukamoto M., Kubota S., Hirai T., Manabe A., Tomisawa Y., Pant A.D., Torikai E.* Cosmic-Ray Muon Spin Rotation in Fe and Industrial Application // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. V. 551. P. 012064.
 27. *Cimmino L., Baccani G., Noli P., Amato L., Ambrosino F., Bonechi L., Bongi M., Ciulli V., D'Alessandro R., D'Errico M., Gonzi S., Melon B., Minin G., Saracino G., Scognamiglio L., Strolin P., Viliani L.* 3D Muography for the Search of Hidden Cavities // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 2974.
 28. *Dedenko L.G., Managadze A.K., Roganova T.M., Bagulya A.V., Vladimirov M.S., Zemskova S.G., Konovalova N.S., Polukhina N.G., Starkov N.I., Chernyavskiy M.M., Grachev V.M.* Prospects of the Study of Geological Structures by Muon Radiography Based on Emulsion Track Detectors // *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 2014. V. 41, No. 8. P. 235–241.
 29. *Aleksandrov A.B., Bagulya A.V., Chernyavsky M.M., Konovalova N.S., Managadze A.K., Orurk O.I., Polukhina N.G., Roganova T.M., Shchedrina T.V., Starkov N.I., Tioukov V.E., Vladymyrov M.S., Zemskova S.G.* Muon Radiography in Russia with Emulsion Technique. First Experiments Future Perspectives // *AIP Conf. Proc.* 2015. V. 1702. P. 110002.

30. *Baklagin S. A., Grachev V. M., Konovalova N. S., Malovichko A. A., Managadze A. K., Polukhina N. G., Roganova T. M., Starkov N. I., Tyukov V. E., Shchedrina T. V.* Large Industrial and Natural Objects Investigation by the Muon Radiography on the Basis of Track Detectors // IJRSET. 2016. V. 5. P. 0507027.
31. *Alekseev V. A., Alexandrov A. B., Bagulya A. V., Chernyavskiy M. M., Goncharova L. A., Gorbunov S. A., Kalinina G. V., Konovalova N. S., Okatyeva N. M., Pavlova T. A., Polukhina N. G., Shchedrina T. V., Starkov N. I., Tioukov V. E., Vladymirov M. S., Volkov A. E.* Current Status and Prospects of Nuclear Physics Research Based on Tracking Techniques // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798, No. 1. P. 012207.
32. *Alexandrov A. B., Chernyavsky M. M., Galkin V. I., Goncharova L. A., Grachev V. M., Konovalov A. S., Konovalova N. S., Korolev P. S., Larionov A. A., Managadze A. K., Melnichenko I. A., Okateva N. M., Polukhina N. G., Roganova T. M., Sadykov Zh. T., Shchedrina T. V., Shevchenko V. I., Starkov N. I., Starkova E. N., Tyukov V. E., Vasina S. G.* Muography of Large Natural and Industrial Objects // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 6. P. 20–26.
33. *Ariga A., Ariga T., de Lellis G., Ereditato A., Niwa K.* Nuclear Emulsions // Particle Physics Ref. Library. 2020. V. 2. P. 383–438.
34. *Abiev A., Bagulya A., Chernyavsky M., Dashkina A., Dimitrienko A., Gadjiiev A., Gadjiiev M., Galkin V., Gippius A., Goncharova L., Grachev V., Konovalova N., Managadze A., Okateva N., Polukhina N., Roganova T., Shchedrina T., Starkov N., Teymurov A., Tioukov V., Vasina S., Zarubin P.* Muon Radiography Method for Non-Invasively Probing an Archaeological Site in the Naryn-Kala Citadel // Appl. Sci. 2019. V. 9, No. 10. P. 2040.
35. *Abiev A. K., Bagulya A. V., Chernyavsky M. M., Dimitrienko A. A., Gadjiiev A. A., Gadjiiev M. S., Galkin V. I., Gippius A. A., Goncharova L. A., Grachev V. M., Konovalov A. S., Konovalova N. S., Managadze A. K., Okateva N. M., Polukhina N. G., Roganova T. M., Shchedrina T. V., Starkov N. I., Teymurov A. A., Tioukov V. E., Vasina S. G., Zarubin P. I.* Muography of Large Natural and Industrial Objects // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82, No. 6. P. 804–808.
36. *Zemskova S. G., Starkov N. I.* Methodical Notes on the Use of Cosmic Muons in Radiography // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2015. V. 42, No. 2. P. 37–42.
37. *Zemskova S. G., Starkov N. I.* Results of the Model Experiment on Cosmic Muon Radiography of a Mountain // Ibid. No. 6. P. 157–164.
38. *Kremer M., Boezio M., Ambriola M. L., Barbiellini G., Bartalucci S.* Measurements of Ground-Level Muons at Two Geomagnetic Locations // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 4241–4244.
39. *Groom D. E., Mikhov N. V., Striganov S. I.* Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV–100 TeV // At. Data Nucl. Data Tables. 2001. V. 78. P. 183–356.
40. *Alexandrov A., Konovalova N., Okateva N., Polukhina N., Starkov N., Shchedrina T.* Upgrade and New Applications of the Automated High-Tech Scanning Facility PAVICOM for Data Processing of Track Detectors // Measurement. 2022. V. 187. P. 110244.
41. *Tioukov V., Kreslo I., Petukhov Y., Sirri G.* The FEDRA — Framework for Emulsion Data Reconstruction and Analysis in the OPERA Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 559. P. 103–105.