

УДК 53.043

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ СТРОЕНИЙ В СВЯТО-ТРОИЦКОМ ДАНИЛОВОМ МОНАСТЫРЕ МЕТОДОМ МЮОННОЙ РАДИОГРАФИИ

Н. С. Коновалова¹, А. С. Коновалов², Н. М. Окальева¹,
Н. И. Старков¹, Т. В. Щедрина¹

Представленная работа входит в ряд совместных исследований нескольких российских институтов по изучению археологических объектов на территории России методом мюонной радиографии. Метод применяется для изучения внутренней структуры и скрытых областей крупных природных и промышленных объектов с помощью мюонов. В данной работе он используется для поиска скрытых объектов на территории Свято-Троицкого Данилова монастыря в г. Переславле-Залесском.

Ключевые слова: метод мюонной радиографии, ядерная эмульсия, распознавание образов, поиск скрытых археологических объектов.

Введение. Высокоэнергичные мюоны вторичного космического излучения обладают большой проникающей способностью, позволяющей им, пройдя через земную атмосферу, пронизывать объекты на поверхности земли и под ней. Особенности регистрируемого потока мюонов, прошедшего через объект, зависят от его внутренней структуры: более плотные области ослабляют поток сильнее, чем менее плотные. Метод мюонной радиографии (МР) – это метод зондирования крупномасштабных природных объектов и инженерных конструкций, в основе которого лежит анализ результатов поглощения и рассеяния мюонов космического происхождения при их прохождении через вещество изучаемого объекта (см., напр., [1]).

В России проводится серия экспериментов по поиску скрытых объектов на территориях исторических памятников, осуществляемые методом МР. В 2018 году было

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ninakonovalova@yandex.ru.

² Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, 117997 Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

исследовано подземное сооружение неизвестного назначения, расположенное в цитадели Нарын-кала (г. Дербент, Дагестан) [2]. Новым объектом исследований, проводимых группой сотрудников ФИАН, НИТУ “МИСиС” и НИИЯФ МГУ при финансовой поддержке НИТУ “МИСиС”, стали древние сооружения на территории Свято-Троицкого Данилова мужского монастыря в Переславле-Залесском. Предполагается, что под землёй могут находиться фрагменты фундаментов и скрытые помещения. Поскольку проведение раскопок в границах действующего монастыря, являющегося историческим памятником, исключено, в качестве альтернативы был предложен метод МР.

Эксперимент. Основы метода. Хорошо известно, что релятивистские мюоны обладают высокой проникающей способностью. Особенности прохождения мюонов вторичного космического излучения через вещество определяются их энергией и связанной с ней длиной пробега в данном веществе. Прохождение через вещество с большей плотностью приводит к большему ослаблению потока. Таким образом, число зарегистрированных мюонов, помимо времени экспозиции и величины потока частиц, изначально падающих на объект, определяется плотностью материала среды, углами траектории частицы Φ и Θ и пробегом, связанным с её энергией. Анализ углового распределения мюонов, прошедших через объект и зарегистрированных в детекторе, позволяет сделать заключение о наличии неоднородностей в толще вещества в выделенном направлении.

В данной работе используются трековые детекторы на основе ядерной эмульсии, обладающей беспрецедентно высоким пространственным разрешением (см., напр., [3]). Детекторы представляют собой стопки слоёв эмульсии, упакованные в светонепроницаемые пакеты и зафиксированные в вертикальном положении с помощью специально разработанных механических конструкций (рис. 1).

Прошедшие через объект высокоэнергичные мюоны оставляют в эмульсии прямолинейные треки, после проявки различимые под микроскопом. Обработка и анализ полученных данных осуществляются с помощью автоматизированного сканирующего комплекса ПАВИКОМ [4]. В работе комплекса применяется оригинальное авторское программное обеспечение для распознавания треков заряженных частиц в твердотельных детекторах разных типов, в том числе в ядерной эмульсии.

Условия проведения эксперимента. В работах по МР важен корректный учет плотностей грунта и стен зданий. Под почвенно-растительным слоем на участке расположения Свято-Троицкого Данилова монастыря находятся туго- и мягкопластичные суглинки плотностью 1.8–1.85 г/см³ [5]. Основным строительным материалом стен в Троицком соборе Данилова монастыря является кирпич, а цоколь, порталы и некоторые другие



Рис. 1: Эмульсионные детекторы, готовые для установки на объекте.

элементы зданий сделаны из белого камня (доломитового известняка) [6]. На основе этих данных, для анализа были приняты следующие значения плотности стен зданий: русский царский кирпич – 2.0 ± 0.1 г/см³; белый камень – 2.1 ± 0.1 г/см³. Как показывают расчёты, такое соотношение плотностей позволяет обнаружить неоднородности структуры в исследуемых объектах [7].

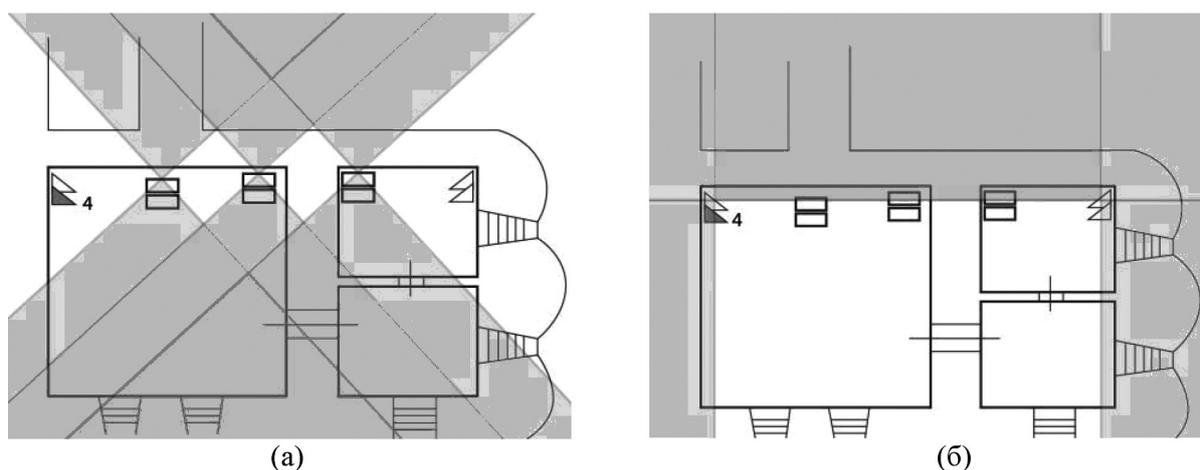


Рис. 2: План подвального помещения церкви Похвалы Божией Матери со схемой установки детекторов: (а) детекторы, установленные параллельно стене, (б) детекторы, установленные под углом 45°.

Зондирующее космическое излучение направлено из верхней полусферы, поэтому детекторы мюонов должны располагаться ниже или сбоку изучаемого объекта. В данном эксперименте, для того чтобы “увидеть” искомые объекты, детекторы были установлены в доступных подвальных помещениях церкви Похвалы Божией Матери. На рис. 2 показан план подвального помещения с расположением детекторов. Регистрируются мюоны, приходящие на детекторы с двух сторон, из секторов обзора, направленных “вперёд” и “назад”. В данном исследовании изучается направление “вперёд”, в сторону искомых замурованных подвальных помещений. На рисунках градациями серого цвета обозначены сектора обзора детекторов. Выбор времени экспозиции детекторов обусловлен интенсивностью потоков мюонов, необходимой для получения наиболее информативной томограммы объекта. Ниже анализируются ожидаемые и первые экспериментальные результаты, полученные с помощью выделенного на схеме детектора 4.

Моделирование. Планирование эксперимента осуществляется на основе компьютерного моделирования [7, 8], при котором создаётся трёхмерная модель изучаемого объекта с учётом различия плотностей грунта и материалов, формирующих фрагменты зданий. Близлежащие строения заменяются эквивалентным количеством материала для учёта поглощения ими проникающих мюонов.

Алгоритм моделирования можно описать схематически с помощью рис. 3, где представлена структура подвального помещения с указанием расположения близлежащих строений. Масштабы строений на схемах соответствуют реальным. Стрелкой на схеме горизонтального разреза обозначено гипотетическое скрытое помещение. Сектор обзора детектора показан в прямоугольной системе координат, связанной с поверхностью земли, с началом в точке расположения детектора 4. При моделировании на детектор направляются лучи, обозначающие траектории мюонов в пределах сектора обзора, заданные значениями азимутального и зенитного углов Φ и Θ . На каждом луче находятся точки пересечения с границами разных материалов и определяются длины пробега мюона между ними. На каждом участке пути вычисляется степень ослабления потока в зависимости от материала и длины пути в нём. В результате определяется величина потока мюонов, достигших детектора в данном направлении. Используется по 30 шагов по углам Φ и Θ , т. е. всего 900 направлений. Пересечения траекторий частиц с границами материалов на схемах обозначены точками. Исходное распределение мюонов по угловой части сферических координат $F^{\text{in}}(\Phi, \Theta)$ задаётся на основе данных работы [9] и зависимости от Θ в виде $F^{\text{in}}(\Theta) \sim \cos^2 \Theta$.

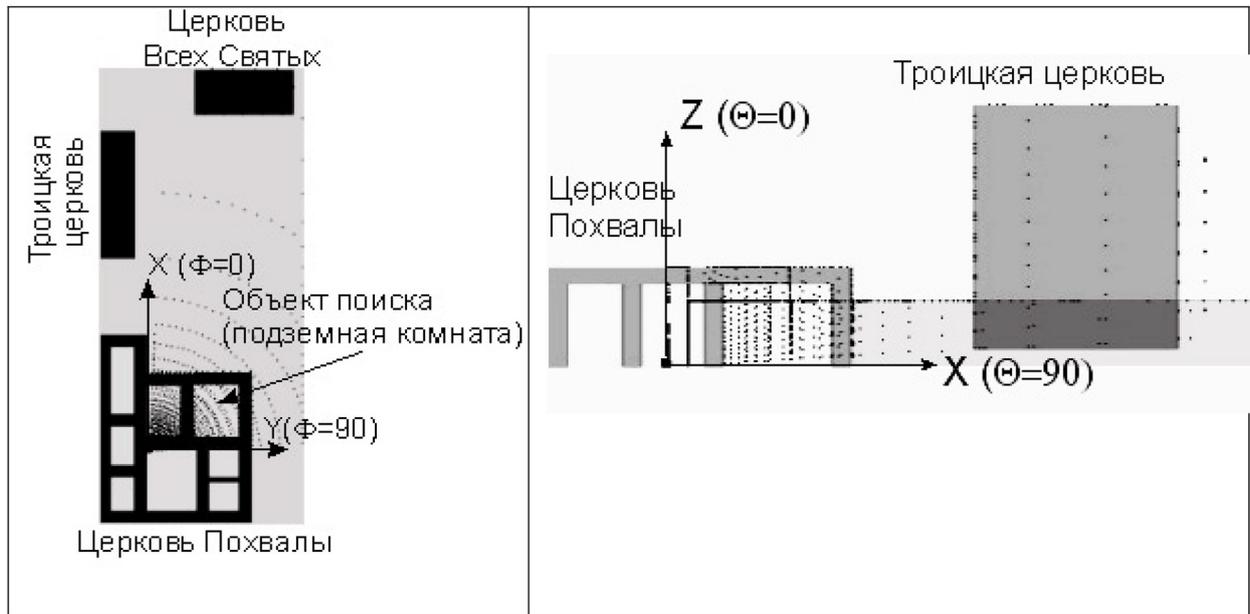


Рис. 3: Горизонтальный (слева) и вертикальный (справа) разрезы подвального помещения церкви Похвалы Божией Матери с указанием близлежащих строений. Более светлый фон соответствует грунту, более тёмный – строениям. Точками обозначены места пересечения границ материалов мюонами.

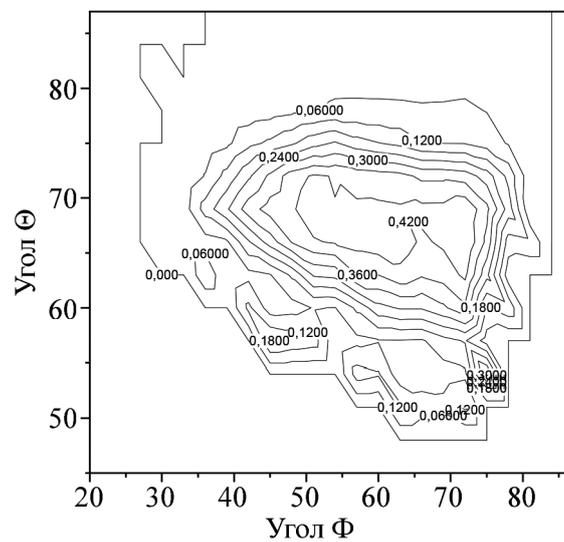


Рис. 4: Результат модельного эксперимента, показывающий наличие скрытого помещения в грунте в переднем секторе обзора детектора 4.

На рис. 4 приведён результат модельного эксперимента для детектора 4. Вычислялись потоки мюонов в случае присутствия подземной комнаты F_1 и без неё F_2 . Показана разность потоков $\Delta F = F_1 - F_2$, зарегистрированных в переднем секторе обзора детектора, значения которых определяются как $\frac{\text{число мюонов}}{\text{м}^2 \cdot \text{степ} \cdot \text{с}}$. Ненулевая разница между потоками, зарегистрированная в интервале углов $30^\circ < \Phi < 80^\circ$ и $55^\circ < \Theta < 75^\circ$, свидетельствует о наличии скрытого помещения в грунте в данном направлении.

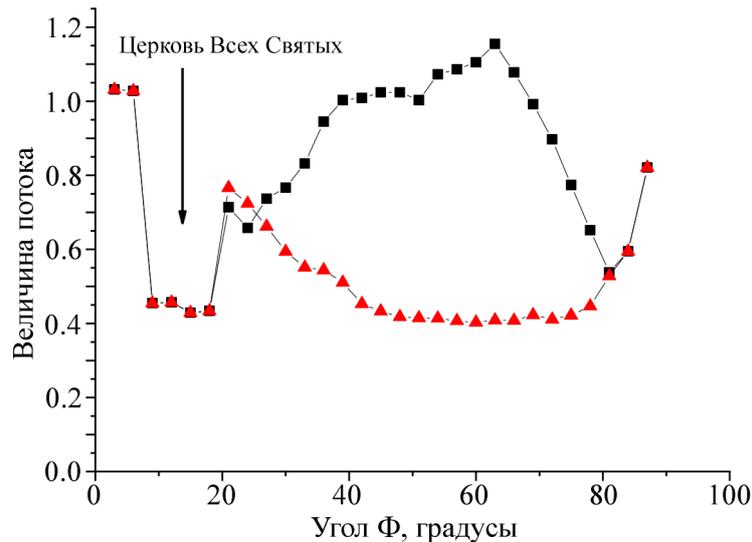


Рис. 5: Величины потоков в переднем секторе обзора детектора 4 в зависимости угла Φ при фиксированном угле Θ . Квадратами показан результат моделирования при наличии скрытого помещения, треугольниками – при его отсутствии.

Ещё более чётко разница между этими двумя случаями видна на рис. 5, где даны величины смоделированных потоков мюонов при наличии скрытого помещения и при его отсутствии, как функция угла Φ при фиксированном угле $\Theta = 70^\circ$. При сравнении потоков, помимо почти трёхкратной разницы по абсолютной величине, чётко видны “тени” от близлежащих строений. Использование детекторов с пересекающимися секторами обзора позволит определить границы скрытого объекта.

Первые результаты. На рис. 6 показаны первые результаты обработки экспериментальных данных, полученных с помощью детектора 4 (время экспозиции 3 месяца). Зона обзора детектора охватывает почти всю область тестирования (см. рис. 2), однако на рис. 6 приведён только узкий участок, содержащий аномалию в угловом распределении числа зарегистрированных частиц в элементе телесного угла $\Phi \approx 220^\circ - 340^\circ$ и $\Theta \approx 25^\circ - 30^\circ$.

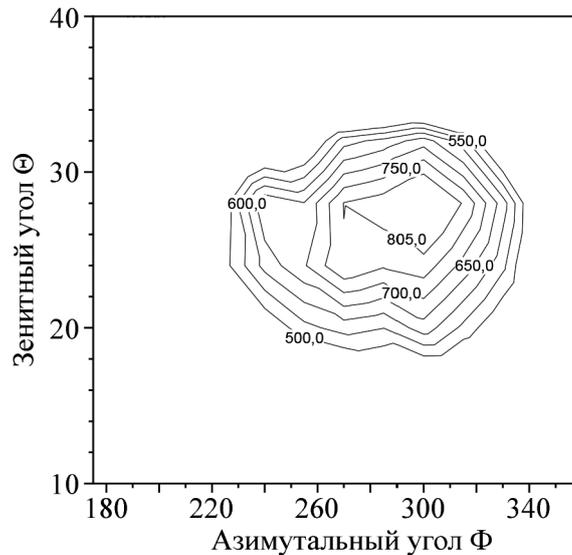


Рис. 6: Аномалия числа треков в детекторе 4, зарегистрированная в направлении искомых объектов.

При указанном положении детекторов экспериментальные данные в диапазоне углов $180^\circ < \Phi < 360^\circ$ относятся к зарегистрированным в интересующей нас области переднего сектора обзора. Результаты измерений детектора 4 в этой области демонстрируют превышение числа зарегистрированных треков в интервале $\Theta \approx 25^\circ - 30^\circ$ над остальным потоком. Найденная аномалия будет служить целеуказанием для дальнейших исследований в выделенном направлении. В настоящий момент продолжается сканирование и обработка экспериментальных данных с целью набора статистически достоверной выборки, а также построение алгоритма 3D-реконструкции с целью возможности восстановить пространственный объект.

Заключение. В работе даётся описание эксперимента по исследованию скрытых подземных объектов на территории Свято-Троицкого Данилова монастыря в Переславле-Залесском. Эксперимент проводится методом мюонной радиографии, позволяющим осуществлять исследования без нарушения структуры исторического объекта. Описаны основы метода, подробности проведения эксперимента и используемая аппаратура. Анализируются результаты моделирования прохождения зондирующего излучения через объект и первые полученные экспериментальные данные. Предварительные результаты позволяют выделить некоторые особенности в распределении плотности зарегистрированных треков, что может служить целеуказанием для дальнейших исследований.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. Б. Александров, М. С. Владимиров, В. И. Галкин и др., УФН **187**(12), 1375 (2017). DOI: 10.3367/UFNr.2017.07.038188.
- [2] A. Abiev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, et al., Appl. Sci. **9**(10), 2040 (2019). DOI: 10.3390/app9102040.
- [3] Л. Г. Деденко, А. К. Манагадзе, Т. М. Роганова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **41**(8), 34 (2014). DOI: 10.3103/S1068335614080065.
- [4] A. B. Aleksandrov, I. Yu. Apacheva, E. L. Feinberg, et al., Proc. International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena **5974**, 597416 (2006). DOI: 10.1117/12.640105.
- [5] *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Третье поколение. Центрально-Европейская серия. Карта четвертичных образований* (Инженерная геология СССР под ред. Кирикова В.П. Том 1 – Русская платформа, ФГБУ “ВСЕГЕИ”, 2015).
- [6] И. Б. Пуришев, *Реставрация памятников архитектуры: Сборник статей* (Переславль-Залесский, Переславский совет ВООПИиК, 2010), с. 95.
- [7] С. Г. Земскова, Н. И. Старков, Краткие сообщения по физике ФИАН **42**(2), 11 (2015). DOI: 10.3103/S1068335615020025.
- [8] С. Г. Земскова, Н. И. Старков, Краткие сообщения по физике ФИАН **42**(6), 3 (2015). DOI: 10.3103/S1068335615060019.
- [9] J. Kremer, M. Boezio, M. L. Ambriola, et al., Phys. Rev. Lett. **83**(21-22), 4241 (1999). DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.4241.

Поступила в редакцию 11 марта 2020 г.

После доработки 20 апреля 2020 г.

Принята к публикации 21 апреля 2020 г.