

МЮОНОГРАФИЯ ПЕЩЕРНОГО ХРАМА СВЯТО-УСПЕНСКОГО ПСКОВО-ПЕЧЕРСКОГО МОНАСТЫРЯ

А. Б. Александров^{1,2}, А. М. Анохина^{2,3}, С. Г. Васина¹, А. А. Гиппиус¹, С. А. Горбунов¹,
В. М. Грачев⁴, Н. С. Коновалова^{1,2}, Ю. О. Красильникова², А. А. Ларионов⁴,
А. К. Манагадзе³, И. А. Мельниченко², Н. М. Окатьева^{1,2}, С. С. Парамонов²,
А. А. Петрухин⁴, Н. Г. Полухина^{1,2,4}, Т. М. Роганова³, Ж. Т. Садыков^{1,2},
Н. И. Старков^{1,2}, Е. Н. Старкова¹, В. Э. Тюков¹, М. М. Чернявский¹,
В. И. Шевченко⁴, Т. В. Щедрина^{1,2}

Метод визуализации внутренней структуры объектов (метод мюонографии), основанный на анализе особенностей прохождения мюонов, образующихся в результате взаимодействия космических лучей с атмосферой, использует полученные с помощью детекторов пространственные распределения траекторий проникающих мюонов. Метод находится на стыке физики элементарных частиц со многими другими областями естествознания, например, с археологией. В статье представлены результаты мюонографического исследования двух объектов в пещерном комплексе уникального историко-археологического памятника – Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря. Техника эксперимента базируется на использовании ядерно-эмульсионных детекторов.

Ключевые слова: ядерные эмульсии, мюоны, мюонография, автоматические сканирующие системы, распознавание образов.

Введение. Метод мюонографии – использование космического излучения для “просвечивания” крупных объектов под землей и на земной поверхности – впервые был

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: tvshchedrina@gmail.com.

² НИТУ МИСИС, 119049 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4.

³ НИИЯФ МГУ, 119234 Россия, Москва, Ленинские горы, 1.

⁴ НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

предложен академиком П. П. Лазаревым в 1926 году [1]. Однако мюон, как частица, наиболее подходящая по своим характеристикам для такого просвечивания, был открыт позже – в 1936 году. Практическое использование метода мюонографии началось с 1955 года [2]. Сложность применения электронных детекторов (напр., необходимость подвода электропитания, дежурства персонала во время экспозиции, минимальные размеры детектора и др.) существенно ограничивала возможности метода. Ренессанс метода мюонографии, наблюдаемый в последние годы, во многом связан с прогрессом в технике экспериментов с ядерными фотоэмульсиями [3, 4]. Создание высокопроизводительных автоматизированных микроскопных комплексов решило проблему сканирования фотоэмульсий и успешной обработки больших объемов экспериментальных данных [5, 6]. Например, одна сканирующая станция способна за секунду обрабатывать десятки тысяч треков в каждом слое ядерной фотоэмульсии, на что при ручной обработке у человека уходило годы.

Методом мюонографии исследуют крупные, вплоть до километрового размера, объекты: природные (горы, вулканы, ледниковые плиты, структурные особенности на других планетах), промышленные (шахты, мосты, дамбы, домны, атомные реакторы), историко-архитектурные (пирамиды, здания, храмы, гроты, и др.) [7–10]. Важной особенностью мюонографии является неинвазивность проводимых исследований, что позволяет изучать внутреннюю структуру объектов без нарушения их целостности. Это достоинство метода имеет принципиальное значение при исследовании инженерных конструкций и исторических памятников.

Авторами представленной работы выполнены несколько мюонографических проектов в России по исследованию промышленных объектов и объектов культурного наследия. В архитектурном комплексе цитадели Нарын-Кала (г. Дербент, Дагестан), являющейся объектом всемирного наследия ЮНЕСКО, обследовано подземное крестово-купольное сооружение. Полученные данные позволили определить параметры стен постройки [11]. Ещё один мюонографический эксперимент был успешно выполнен на территории объекта федерального значения – Свято-Троицкого Данилова монастыря в г. Переславле-Залесском (Ярославская область) [12]. Были обнаружены два ранее неизвестных помещения в замурованной части подвалов Церкви Похвалы Божьей Матери, области с повышенной плотностью в недоступных частях подвала этого здания и две большие полости неизвестного назначения, расположенные под землёй на территории между церквями, возможно, древние крипты. В 2022 году успешная авторская работа по изучению зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монасты-

ря в Переславле-Залесском была отмечена Макариевской премией. В данной работе представлены результаты исследования двух объектов уникального пещерного храма в Свято-Успенском Псково-Печерском монастыре: скрытого за большой иконой склепа на входе в пещеры и Троицкой улицы в пещерах.

Метод. Мюоны возникают в результате распада заряженных π - и K -мезонов, которые образуются в верхних слоях атмосферы при взаимодействии частиц первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы Земли. Потоки мюонов космического происхождения составляют около 80% всех наблюдаемых частиц вторичного космического излучения на уровне моря. Практически во всем мюон похож на электрон, но масса мюона (106 МэВ) на два порядка больше массы электрона.

Время жизни мюонов в собственной системе отсчёта t_0 составляет около 2.197×10^{-6} сек. Однако благодаря релятивистскому замедлению времени в соответствии со специальной теорией относительности, атмосферные мюоны при скорости, близкой к скорости света, в системе отсчёта Земли живут существенно дольше и могут преодолевать значительные расстояния. Например, для мюона с относительно небольшой энергией $E = 1$ ГэВ время жизни составит $\tau = \tau_0 \gamma \approx 21$ мкс, и мюон пройдет расстояние $c\tau \approx 6.3$ км.

Мюоны, не являясь ядерно-активными частицами, теряют свою энергию в основном за счет электромагнитных взаимодействий с электронами и ядрами вещества. Отсутствие сильных взаимодействий и относительно большая масса покоя мюонов обуславливают их высокую проникающую способность по сравнению с адронами, электронами и γ -квантами. В результате атмосферные мюоны не только преодолевают атмосферу Земли, но и проникают глубоко в грунт – в зависимости от их энергии. Мюоны с энергиями $E_\mu \sim 10^{12} - 10^{13}$ эВ, достигшие уровня моря, регистрируются в подземных экспериментах на глубине до 8.6 км водного эквивалента (или около 2 км скального грунта) [13]. Поток проникающих мюонов составляет на уровне моря около 10^4 частиц/(м²·мин).

Суть метода мюонографии базируется на сравнении степени поглощения атмосферных мюонов разными частями изучаемого объекта. Различная степень ослабления потоков мюонов с разных направлений позволяет распознать местоположение и размеры неоднородностей внутри объекта, при этом детекторы располагаются обычно ниже или сбоку исследуемого объекта. Таким образом, для изучения особенностей внутреннего строения объекта необходимо с помощью детекторов проанализировать угловые распределения проходящих через объект и зарегистрированных в детекторах потоков мюонов. Наиболее информативной является постановка эксперимента с несколькими

детекторами, поскольку это даёт возможность получить 3D-распределение материала в интересующих нас границах объекта.

Эмульсионные детекторы, регистрирующие заряженные частицы, обладают самым высоким, по сравнению с другими детекторами элементарных частиц, пространственным (< 1 мкм) и угловым (~ 1 мср) разрешением. После проявления эмульсий измерения в эмульсионных плёнках осуществляются с помощью автоматизированных оптических микроскопов, обеспечивающих скорость сканирования двухсторонних ядерных эмульсий до сотен см²/час, что позволяет в режиме реального времени обрабатывать большие объёмы эмульсионных данных. Обработка данных детекторов позволяет получить угловые распределения треков зарегистрированных мюонов, плотность которых, в зависимости от длительности экспозиции, может составлять до нескольких тысяч на один квадратный метр. В данной статье представлен эксперимент, также проведенный с использованием эмульсионных детекторов.

Современный уровень обработки и анализа данных эмульсионных экспериментов в России достигнут на высокотехнологичном измерительном комплексе ПАВИКОМ [14]. На основе разработанного программного обеспечения в режиме полной автоматизации на ПАВИКОМ осуществляется поиск и оцифровка пространственных и угловых координат треков заряженных частиц в материале трекового детектора, распознавание и прослеживание треков во всех слоях эмульсии детектора, систематизация и первичная обработка данных.

Эксперимент. В настоящее время методом мюонографии выполнено исследование двух объектов пещерного храма Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря (рис. 1(а)). Монастырь, основанный в 1473 г., расположен в г. Печоры Псковской области в естественном углублении на холме из песчаника. Под холмом расположена система пещер предположительно природного происхождения (“Богом зданные пещеры”, рис. 1(б)). Самым древним храмом монастыря является Успенская пещерная церковь, на фасаде которой слева расположен вход в подземные пещерные галереи. Используемые со времён основания монастыря как подземный некрополь, семь пещерных галерей имеют общую протяжённость более 200 м и находятся на глубине от 3 до 15 м.

Научные исследования этих пещер, которые могли бы подтвердить или опровергнуть версии об их происхождении, до последнего времени не проводились. При этом существует предположение, что под землёй могут находиться другие скрытые помещения помимо тех, к которым имеется доступ, например, в виде продолжения уже известных галерей. В качестве первых объектов исследования были выбраны: (а) склеп,



Рис. 1: (а) общий вид Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, стрелкой показан вход в пещерный храм; (б) расположение известных подземных галерей на плане монастыря. Цифрами обозначены “улицы” пещерного храма: 1 – Главная; 2 – Старцев; 3 – Храмовая; 4 – Братская; 5 – Троицкая; цветовая шкала обозначает перепад высот на местности. Изображения получены с помощью современных геодезических методов [15].

находящийся за большой иконой на входе в пещеры (были неизвестны его размеры и существует ли продолжение подземных коридоров за склепом) и (б) область за тупиком Троицкой улицы с целью выяснения вопроса о возможном ее продолжении за имеющимся алтарем.

Детекторы и их установка. Для проведения данного эксперимента использовались специально изготовленные детекторы. Детектор представлял собой сборку из шести двухсторонних эмульсионных пластин размером $10.0 \times 12.5 \text{ см}^2$, каждая из которых была упакована с откачкой воздуха в светонепроницаемый пакет и все вместе они были зафиксированы в вертикальном положении при помощи специальных конструкций (рис. 2(а)). Основание конструкции детектора составляло примерно $35 \times 62 \text{ см}^2$, высота 20 см. В этом эксперименте использовались эмульсионные пластины, произведенные российской компанией “Славич”. На рис. 2(б) показано использованное в работе направление координатных осей X , Y и Z в детекторе.

Для сканирования эмульсии и обработки данных была принята система координат (X_d, Y_d, Z_d) , связанная с детектором, как показано на рис. 2(б) (черные оси). Для представления данных использовалась система координат, связанная с поверхностью Земли (X_z, Y_z, Z_z) , которую можно получить из системы детектора, повернув ее на 90° вокруг оси X_d . На рис. 2(б) его оси показаны красным цветом. При представлении данных

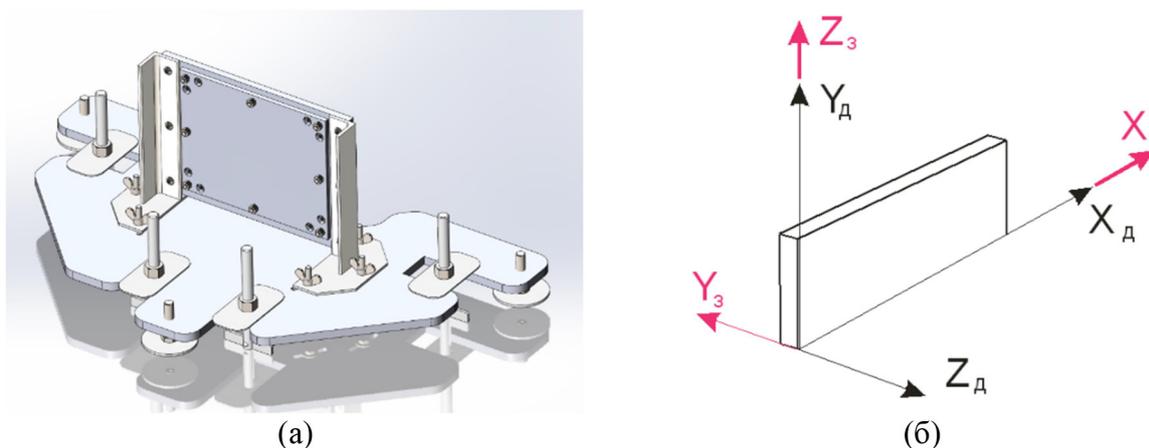


Рис. 2: (а) внешний вид собранного эмульсионного детектора для проведения мюнографии; (б) координатные системы детектора при обработке данных.

используются углы (θ, φ) , где θ – зенитный угол траекторий мюонов относительно оси $Z_з$, φ – азимутальный угол в плоскости детектора. Диапазон углов $\varphi = 0 - 180^\circ$ соответствует “обратному” направлению относительно плоскости детектора, а $\varphi = 180 - 360^\circ$ соответствует направлению “вперед”. Далее графики потоков мюонов при различных значениях (θ, φ) приведены в системе координат $(X_з, Y_з, Z_з)$.

Всего в различных местах монастыря было установлено 13 эмульсионных детекторов. Из них два эмульсионных детектора были размещены на чердаке Успенской церкви для регистрации фонового потока мюонов, а остальные – в подземных галереях.

На рис. 3 показана схема установки детекторов в подземных галереях.

Для привязки пространственного положения установленных детекторов к единой системе координат была проведена геодезическая и лидарная съемка, что позволило определить положение детекторов с сантиметровой точностью, необходимой для интерпретации полученных данных.

Время экспозиции основных детекторов было установлено на основе результатов моделирования и данных контрольных слоёв ядерной эмульсии, помещённых снаружи, на лицевой стороне некоторых детекторов. По совокупности этих данных было установлено, что за время облучения от 3.5 до 4 месяцев ядерные эмульсии смогут набрать необходимую для анализа плотность треков. Через 112 дней с даты установки все детекторы были демонтированы, разобраны, эмульсионные пластины проявлены. Проявленные эмульсионные пластины сканировались на ПАВИКОМ, треки фиксировались в диапазоне углов $\pm 45^\circ$.



Рис. 3: Схема расположения детекторов в пещерах Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря. Красными треугольниками обозначено положение детекторов, номера детекторов – красные цифры от 1 до 11. Острые концы треугольников указывают направление обзора для исследования объектов. Два квадрата на рисунке, обозначенные цифрами I и II, показывают области исследуемых объектов. Буквами К, Н, ДЖ и др. геодезистами на топографической схеме обозначены монастырские строения; серыми цифрами обозначены уровни высоты местности над уровнем моря.

Результаты и обсуждение. Анализировались треки, восстановленные не менее чем в двух и более идущих подряд эмульсионных пластинах одного детектора. Каждый трек характеризуется зенитным углом θ и азимутальным φ .

Поскольку поглощение атмосферных мюонов зависит от количества вещества, пройденного ими в направлении (θ, φ) , вариации зарегистрированных потоков мюонов в этих переменных могут указывать на особенности в распределении материала внутри изучаемого объекта в направлении (θ, φ) .

Результаты измерений представляются в виде распределений числа мюонов. Для этого верхняя полусфера, окружающая детектор, делится на элементы телесного угла (бины) $\Delta\varphi \cdot \Delta\theta$. Затем для каждого такого элемента производится подсчёт числа мюонов, попадающих в него. Полученное распределение (гистограмма) отражает различие в степени поглощения мюонов по разным направлениям, т. е. различие в распределении

материала в зоне обзора. В программе обработки используется разбиение с шагом по $\Delta\varphi = 5^\circ$, $\Delta\theta = 3^\circ$ (72 и 30 бинов, соответственно).

Результаты обработки детекторов, установленных на чердаке для регистрации фонового излучения, продемонстрировали одинаковый зарегистрированный поток как в направлении “вперёд”, так и “назад”, что соответствует ожиданиям, поскольку детектор измерял поток приходящих из атмосферы мюонов [16]. Эти измерения использовались для нормализации экспериментальных данных и вычитания фона в показаниях подземных детекторов.

На рис. 4 приведены данные измерений детектора 2. Два детектора – 2 и 8 были установлены в углубление в стене под иконой на входе, которую для установки детекторов пришлось снять, а потом повесить обратно (рис. 3). Эти детекторы были направлены на исследуемую область I – область предполагаемого склепа. Поэтому в направлении “вперед” они смотрели на предполагаемый замурованный склеп, а в направлении “назад” – на входной коридор в пещеры. На распределении потоков в направлении “назад” детектор зарегистрировал увеличение количества мюонов в диапазонах примерно $\varphi = 75 - 110^\circ$ и $\theta = 62 - 76^\circ$ (рис. 4(а)), что соответствует входному коридору в пещеры. В направлении “вперед” наблюдается увеличение потока в диапазоне примерно $\varphi = 262 - 288^\circ$ и $\theta = 64 - 70^\circ$ (рис. 4(б)), что указывает на существование полости за входной стеной. Правая половина графиков соответствует прохождению мюонов через полость склепа. На распределениях числа частиц по углу φ на рис. 4 разными символами обозначены зависимости для разных θ , на врезке справа приведены значения этих углов θ .

Восстановление объемной картины внутреннего строения исследуемого объекта требует использования данных нескольких детекторов. В этом эксперименте использовался алгоритм реконструкции 3D-структуры, который включал построение угловых распределений с шагом 2° по θ и 3° по φ , где для каждого заданного угла θ определялись положения локальных максимумов распределений φ . Локальный максимум потока обычно соответствует пустоте в заданном направлении или, по крайней мере, пониженной плотности материала объекта. Функция положения максимума может принимать только два значения: 1, когда в данной точке есть максимум, и 0, когда максимума нет. Аналогично для каждого фиксированного φ определялись максимальные потоки по θ . Для каждого детектора были тщательно изучены все возможные направления φ и θ . Третья переменная – высота точки над уровнем моря – была добавлена для определения границ области аномальной плотности по трем измерениям. Высота различных

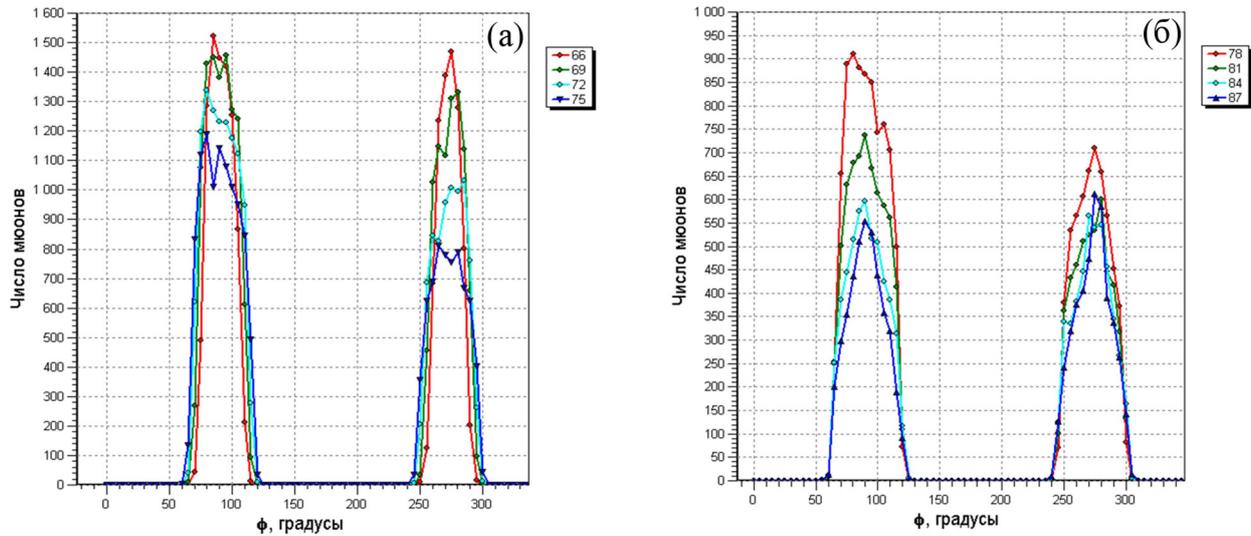


Рис. 4: Распределение количества мюонов по углу φ при фиксированных θ с $\Delta\theta = 3^\circ$ в диапазоне (а) $\theta = 66 - 75^\circ$, (б) $\theta = 78 - 87^\circ$, зарегистрированных в Детекторе 2.

точек холма над уровнем моря указана на рис. 3. При дальнейшем анализе данных на презентацию наносились точки пересечения локальных максимумов с метровыми слоями почвы между фиксированными высотами над уровнем моря. В результате с учетом высоты (точнее, интервала высот) были получены двумерные картины максимумов потоков мюонов с шагом 1 м по высоте. В некоторых точках максимумы потоков от двух и более детекторов перекрываются, тогда можно говорить о пересечении локальных максимумов потоков по данным двух и более детекторов.

Район первого исследуемого участка – крипты у входа – просматривался детекторами 2, 6, 8, 10 и 11 (расположение детекторов показано на рис. 3). Полученные результаты пересечения локальных максимумов потоков с плоскостями на высоте 77–78 м представлены на рис. 5. Справа от детекторов 2 и 8 видна фиолетовая полоса, ширина которой сравнима с поперечными размерами отдельных пещер. Она обозначает пересечение локальных максимумов не менее четырех детекторов, причем в некоторых точках на высоте 77–78 м пересекаются максимумы всех пяти детекторов.

Результаты, полученные по данным пяти детекторов, позволяют примерно оценить положение и геометрическую форму склепа, а также продемонстрировать наличие неизвестного коридора, начинающегося за ним. Полагая наиболее достоверными результаты пересечения локальных максимумов потоков мюонов, зарегистрированных четырьмя детекторами, и руководствуясь полученными распределениями направлений макси-

мальных потоков мюонов, можно утверждать, что на высоте 77–79 м перед детекторами 2 и 8 находится склеп размерами $\sim 2.5 \times 2.5 \text{ м}^2$, от которого в направлении, перпендикулярном Главной улице, ведёт коридор шириной от 1 до 3 метров и длиной до 12 метров.

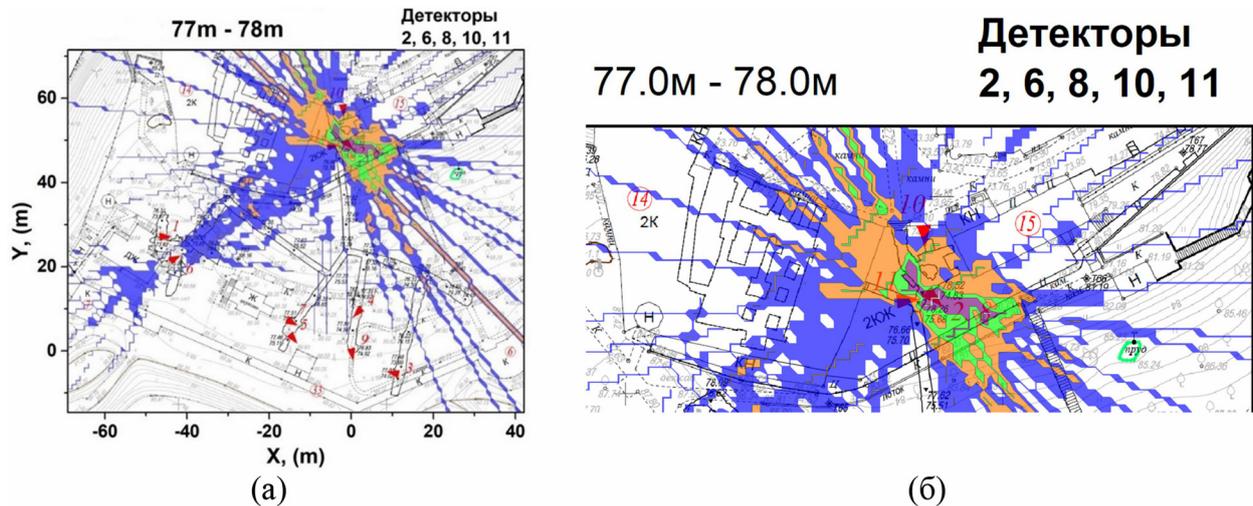


Рис. 5: Пересечение направлений локальных максимумов потока мюонов всех пяти детекторов 2, 6, 8, 10 и 11 с плоскостью между высотами 77 и 78 м: (а) данные нанесены на общий план пещерного храма, видно положение всех пяти детекторов, просматривающих область I; (б) пересечение направлений дано в увеличенном масштабе. Данные одного детектора отмечены синим цветом, пересечение двух детекторов – оранжевым, три детектора – зеленого цвета и четыре детектора – фиолетового цвета.

Детекторы 3, 4, 7 и 9 были ориентированы на территорию за тупиком Троицкой улицы пещер (объект II на рис. 3). Результаты пересечения локальных максимумов потоков с плоскостями на указанных высотах в увеличенном масштабе показаны на рис. 6. Зарегистрировано существование двух областей на высоте 77–79 м, где пересекаются локальные максимумы всех четырех детекторов (пересечение максимумов четырех детекторов отмечено зеленым цветом). Одна находится слева от пещеры между детекторами 4 и 9 (между улицами Братской – улица № 4 на рис. 1(б), и Троицкой – улица № 5 на рис. 1(б)). Второй участок напротив Детектора 9 выглядит как продолжение Троицкой улицы по ее основному направлению.

Полагая наиболее достоверными результаты пересечения локальных максимумов потоков мюонов, зарегистрированных четырьмя детекторами, и руководствуясь полученными результатами пересечений направлений максимальных потоков мюонов, можно утверждать, что на высоте 77–79 м, т. е. непосредственно чуть выше Троицкой ули-

цы, между детекторами 4 и 9 имеется полость, вытянутая перпендикулярно улице. Высота полости около 2 м, геометрические размеры в горизонтальной плоскости около $3 \times 6 \text{ м}^2$. Кроме того, результаты убедительно демонстрируют то, что Троицкая улица имеет продолжение по основному направлению.

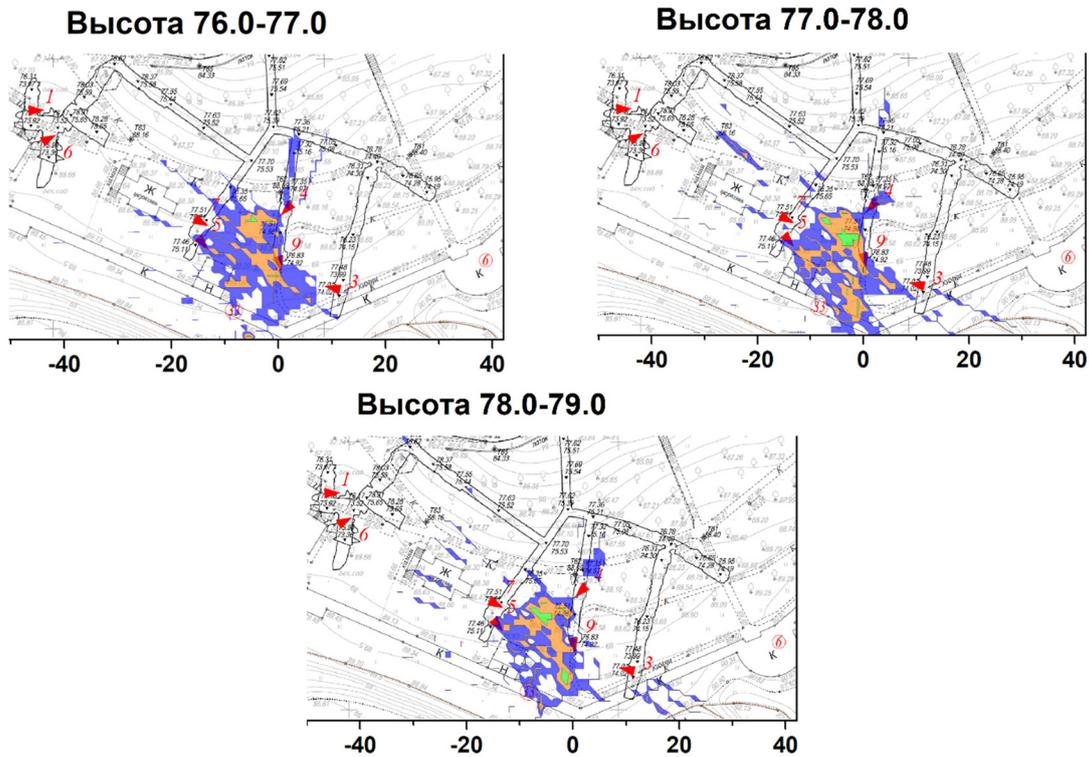


Рис. 6: Увеличенная карта пересечения направлений локальных максимумов потоков мюонов с плоскостями между указанными высотами для Детекторов 3, 4, 7, 9. Здесь пересечение двух детекторов отмечено синим цветом, трех детекторов – оранжевым, четырех – зеленым цветом.

На рис. 7 показаны положения обнаруженных подземных полостей (склеп–область I, и Троицкая улица – область II), привязанные к результатам ЛИДАР-съемки пещерного храма монастыря.

Заключение. Результаты исследования пещерного храма Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря в полной мере демонстрируют возможности метода неинвазивной мюнографии для изучения внутреннего строения крупных природных, промышленных и исторических объектов. Метод основан на измерении степени поглощения атмосферных мюонов, прошедших через исследуемый объект. На основе анализа угловых распределений мюонов, зарегистрированных в детекторах, делается вывод об

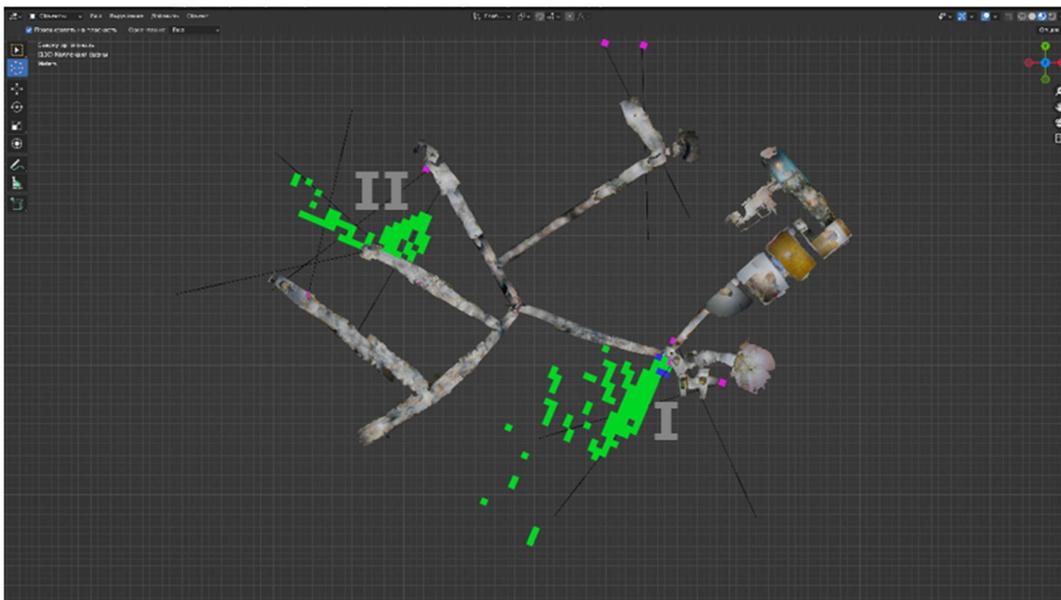


Рис. 7: Обнаруженные полости на карте “Богом данных пещер”: склеп (область I) и Троицкая улица (область II).

особенностях внутреннего строения объекта, в частности, о наличии крупных полостей или участков повышенной плотности материала.

Мюнографическое исследование двух объектов пещерного храма монастыря (склепа за стеной у входа в храм – объект I на рис. 7, и пространства за тупиком Троицкой улицы – объект II на рис. 7) выявило несколько ранее неизвестных полостей значительных размеров. По полученным данным размеры склепа при входе в храм оцениваются примерно в 2.5×2.5 м². От склепа в направлении, перпендикулярном Главной улице, отходит коридор шириной от 1 до 3 метров и длиной до 12 метров. Под землей между Братской и Троицкой улицами обнаружена полость, простирающаяся в направлении, перпендикулярном Троицкой улице. Высота этой полости оценивается в 2 м, а геометрические размеры в горизонтальной плоскости примерно 3×6 м². Кроме того, замеры показывают, что Троицкая улица имеет продолжение по своему основному направлению.

Представленный эксперимент демонстрирует, что российские исследователи располагают хорошо развитой и финансово доступной технологией, позволяющей на уровне современных научных достижений изучать внутренние особенности строения объектов природного и искусственного происхождения, не разрушая их, что открывает новые возможности, в том числе для изучения и сохранения памятников культурного насле-

дия. Авторские методические подходы и технические решения для мюонографических экспериментов на основе эмульсионных трековых детекторов, а также полученные результаты имеют большое значение для дальнейшего внедрения в России эффективного, экономичного и экологически безопасного метода, который может быть использован в исследованиях в области археологии, геологии, атомной энергетики, вулканологии, дефектоскопии и других. На основе разработанных технологий возможно создание систем мониторинга проблемных объектов для минимизации последствий возможных природных и техногенных катастроф для населения, инфраструктуры и окружающей среды.

Работа поддержана Российским научным фондом по программе “Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами” (проект № 23-12-00054).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. В. Кравков, УФН **46**, 441 (1952). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0046.195204a.0441>.
- [2] E. P. George, Commonwealth Engineer **1955**, 455 (1955).
- [3] A. Ariga, T. Ariga, G. De Lellis, et al., Nuclear Emulsions. In Particle Physics Reference Library (Springer, Cham, 2020), vol. 2, p. 383. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6>.
- [4] С. Г. Васина, Н. И. Старков, Н. Г. Полухина, Т. В. Щедрина, Краткие сообщения по физике ФИАН **49**(12), 46 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622120107.
- [5] N. Armenise, M. De Serio, M. Ieva, et al., Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A **551**, 261 (2005). DOI: 10.1016/j.nima.2005.06.072.
- [6] A. Alexandrov, A. Buonauro, L. Consiglio, et al., Sci. Rep. **7**, 7310 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07869-3>.
- [7] S. Procureur, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **878**, 169 (2018). DOI: 10.1016/j.nima.2017.08.004.
- [8] L. Bonechi, R. D’Alessandro, A. Giammanco, Rev. Phys. **5**, 100038 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.revip.2020.100038>.
- [9] Л. Г. Деденко, А. К. Манагадзе, Т. М. Роганова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **41**(8), 34 (2014). DOI: 10.3103/S1068335614080065.
- [10] А. Б. Александров, М. С. Владимиров, В. И. Галкин и др., УФН **187**, 1375 (2017). DOI: 10.3367/UFNr.2017.07.038188.

- [11] A. Abiev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, et al., *Appl. Sci.* **9**(10), 2040 (2019). DOI: 10.3390/app9102040.
- [12] Н. С. Коновалова, А. С. Коновалов, Н. М. Окатьева и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **48**(6), 26 (2021). DOI: 10.3103/S106833562106004X.
- [13] M. Aglietta, E. D. Alyea, P. Antonioli, et al., *Phys. Atom. Nucl.* **66**, 123 (2003). DOI: 10.1134/1.1540666.
- [14] A. Alexandrov, N. Konovalova, N. Okateva, et al., *Measurement* **187**, 110244 (2022). DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110244.
- [15] И. А. Мельниченко, Доклад на XIX Международном форуме-конкурсе студентов и молодых учёных “Актуальные проблемы недропользования”, Санкт-Петербург, 22-26 мая 2023.
- [16] A. Alexandrov, A. Anokhina, S. Vasina, et al., *Phys. At. Nucl.* 2023, in print.

Поступила в редакцию 10 октября 2023 г.

После доработки 6 ноября 2023 г.

Принята к публикации 7 ноября 2023 г.