DOI: 10.53737/2713-2021.2026.21.55.011

А.Б. Александров, С.А. Горбунов, Д.Н. Морозова, Н.С. Коновалова, Ю.О. Красильникова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, Д.М. Стрекалина, Т.В. Щедрина

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЮОНОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ И ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ*

Активно развивающийся метод мюонографии заключается в «просвечивании» крупных объектов, находящихся на поверхности земли и под ней, высокоэнергичными атмосферными мюонами и изучении мюонных потоков, прошедших через объект с разных направлений. Регистрация потоков мюонов позволяет оценить степень их поглощения в материале объекта и таким образом определить пространственное положение и размеры областей повышенной или пониженной плотности внутри объекта, скрытых от прямого наблюдения. Метод успешно применяется для исследования залежей полезных ископаемых, крупных природных и промышленных объектов, археологических и историко-культурных памятников без нарушения их целостности. Целью статьи является информирование специалистов широкого профиля об уникальных возможностях метода мюонографии при изучении историко-архитектурных и социально значимых объектов. Представлены примеры проведенных авторами экспериментов по изучению историко-архитектурных объектов в России и результаты моделирования мюонографических исследований погребально-поминального комплекса Каркара в Республике Казахстан и зон трещиноватости в районе оползней на склоне горы Бытха Большого Сочи.

Ключевые слова: мюонография, зондирование крупных объектов атмосферными мюонами, поиск скрытых архитектурных фрагментов.

Сведения об авторах: Александров Андрей Борисович[1], кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; Горбунов Сергей Александрович[2], кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; Морозова Дарья Николаевна[3], инженер, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС; Коновалова Нина Сергеевна[4], кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; Красильникова Юлия Олеговна[5], главный инженер-исследователь, Университет науки и технологий «Сириус»; Окатьева Наталья Михайловна[6], кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; Полухина Наталья Геннадьевна[7], профессор, доктор физико-математических наук, руководитель исследовательской группы, Университет науки и технологий «Сириус», зав. Лабораторией элементарных частиц ФИАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, ведущий эксперт, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС; Старков Николай Иванович[8], доктор физико-математических наук, высококвалифицированный главный научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; Старкова Елена Николаевна[9], высококвалифицированный младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; Стрекалина Дарья Михайловна[10], кандидат химических наук, заместитель руководителя исследовательской группы, Университет науки и технологий «Сириус», Щедрина Татьяна Викторовна[11], высококвалифицированный старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

* Статья подготовлена в рамках финансирования государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус», Соглашение № 34-03 от 05.08.2025.

Статья поступила в номер 19 января 2026 г.
Принята к печати 11 февраля 2026 г.

© А.Б. Александров, С.А. Горбунов, Д.Н. Морозова, Н.С. Коновалова, Ю.О. Красильникова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, Д.М. Стрекалина, Т.В. Щедрина, 2026.

Контактная информация: [1,2,4,6–9,11]119991, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, e-mail: ninakonovalova@yandex.ru;[3,5,7]119049 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, e-mail: polukhinang@lebedev.ru; [5,7,]354349, Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр-т., 1, e-mail: polukhinang@lebedev.ru.

Andrei Alexandrov, Sergei Gorbunov, Daria Morozova, Nina Konovalova, Yulia Krasilnikova, Natalia Okateva, Natalia Polukhina, Nikolai Starkov, Elena Starkova, Daria Strekalina, Tatiana Shchedrina

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF MUOGRAPHIC RESEARCH ON ARCHAEOLOGICAL SITES AND CULTURAL HERITAGE OBJECTS

The rapidly developing method of muography involves imaging large objects on and beneath the Earth's surface using high-energy atmospheric muons and analyzing muon fluxes passing through these objects from different directions. Measuring muon fluxes makes it possible to estimate the degree of muon absorption within the material of an object and thus determine the spatial locations and dimensions of regions of increased or decreased density that are hidden from direct observation. The method has been successfully applied to the investigation of mineral deposits, large natural and industrial structures, and archaeological and cultural heritage sites without compromising their structural integrity. The aim of this article is to inform specialists from various fields about the unique capabilities of muography in investigating historical, architectural, and socially significant structures. The article presents examples of experiments conducted by the authors to investigate historical and architectural structures in Russia, as well as the results of simulations of muographic investigations of the Karkara funerary and memorial complex in the Republic of Kazakhstan and fracture zones in the landslide area on the slope of Mount Bytha in Greater Sochi.

Key words: muography, probing large objects using atmospheric muons, detection of hidden architectural features.

About the authors: Alexandrov Andrei[1], PhD (Physics and Mathematics), qualified Senior Researcher, Lebedev Physical Institute, RAS; Gorbunov Sergei[2], PhD (Physics and Mathematics), qualified Senior Researcher, Lebedev Physical Institute, RAS; Morozova Daria[3], engineer, National University of Science and Technology MISIS; Konovalova Nina[4], PhD (Physics and Mathematics), qualified Leading Researcher, Lebedev Physical Institute, RAS; Krasilnikova Yulia[5], Chief Research Engineer, Sirius University of Science and Technology, Head of the Science Department, National University of Science and Technology MISIS; Okateva Natalia[6], PhD (Physics and Mathematics), qualified Senior Researcher, Lebedev Physical Institute, RAS; Polukhina Natalia[7], Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Research Group, Sirius University of Science and Technology, Sirius Federal Territory, Chief of laboratory, Lebedev Physical Institute, RAS, Leading Expert, National University of Science and Technology MISIS; Starkov Nikolai[8], Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), qualified Principal Researcher, Lebedev Physical Institute, RAS; Starkova Elena[9], qualified Junior researcher, Lebedev Physical Institute, RAS; Strekalina Daria[10], PhD (Chemistry), Deputy Head of the Research Group, Sirius University of Science and Tehnology, Sirius Federal Territory; Shchedrina Tatiana[11], PhD (Physics and Mathematics), qualified Senior Researcher, Lebedev Physical Institute, RAS.

Contact information: [1,2,4,6–9,11]119991, Russia, Moscow, Lebedev Physical Institute, RAS, 53 Leninsky av., e-mail: ninakonovalova@yandex.ru; [3,5,7]119049, Russia, Moscow, National University of Science and Technology MISIS, 4 Leninsky av., e-mail: polukhinang@lebedev.ru; [5,7,10]354349, Russia, Krasnodar Territory, Sirius Federal Territory, 1 Olimpiysky Av., e-mail: polukhinang@lebedev.ru.

Введение

Метод визуализации внутренней структуры крупных природных и промышленных объектов (метод мюонографии) основан на анализе степени поглощения в них потоков высокоэнергичных мюонов, образующихся в результате взаимодействий частиц первичного космического излучения в атмосфере (Bonechi et al. 2020; Bonomi et al. 2020; Cimmino et al. 2019;

Cimmino 2021; Oláh et al. 2022). Такой анализ позволяет не только определять положение и размеры локальных скрытых особенностей плотности, таких как пустоты, склепы, каверны или различные уплотнения, но и восстанавливать сложную форму более протяжённых структур. Мюонографическое исследование археологических объектов любой сложности даёт возможность построения карты трёхмерного распределения плотности внутри объекта и позволяет специалистам разрабатывать, при необходимости, мероприятия для его защиты и реставрации.

Применяемые в настоящее время в археологии традиционные геофизические методы для измерения распределения плотности основаны на принципах микрогравитациии сейсморазведки (El-Qady et al. 2019) и обладают рядом недостатков, среди которых высокая трудоёмкость и стоимость исследований, низкое разрешение, небольшая глубина проникновения. Быстро развивающийся инновационный метод мюонографии лишён этих недостатков и является эффективным дополнением к существующим поисковым геофизическим технологиям. Метод основан на принципах, аналогичных рентгенографии, применяемой в медицине.

Основными преимуществами метода мюонографии являются использование природного источника проникающего излучения, что гарантирует радиационную безопасность исследований, применение портативных детекторов (в случае использования детекторов на основе ядерных фотоэмульсий) и возможность долгосрочного мониторинга крупномасштабных объектов без риска их повреждения. Эти преимущества особенно востребованы в археологических исследованиях, вследствие чего мюонография вызывает большой интерес у специалистов в этой области (см. Saracino et al. 2019; Lagrange et al. 2025). Показательно, что одно из первых крупных исследований методом мюонографии было проведено именно в области археологии. Научная группа под руководством Луиса У. Альвареса в поисках неизвестных полостей в пирамиде Хефрена регистрировала проходящие мюоны с помощью искровых камер (Alvarez et al. 1970). Эксперимент показал отсутствие полостей, которые можно было бы классифицировать как искусственные помещения.

Эксперимент 2017 г. в рамках проекта ScanPyramids, проведённый учеными из Японии, Франции и Египта, на основе трёх различных технологий представил убедительные доказательства существования неизвестной ранее пустоты внутри пирамиды Хеопса, одной из Великих пирамид Гизы (Morishima et al. 2017). Пустота с поперечным сечением около 8 м и длиной около 30 м, получившая название ScanPyramidsBigVoid (рис. 1), в 2016 г. была впервые обнаружена с помощью ядерно-эмульсионных детекторов, установленных в камере Царицы, а в 2017 г. подтверждена с помощью сцинтилляционных годоскопов, установленных в той же камере, и газовых детекторов, располагавшихся снаружи. Эксперимент убедительно продемонстрировал новые возможности для изучения исторического наследия на основе высокотехнологичных методов современной физики элементарных частиц.

Ещё одним примером успешного применения мюонографии в археологии стало изучение историко-архитектурного памятника в Неаполе, расположенного на глубине нескольких десятков метров ниже уровня существующей застройки (Tioukov et al. 2023). Памятник предположительно является фрагментом эллинского некрополя, относящегося к I тыс. до н.э. Исторический слой, ставший объектом исследования, находится на глубине 8÷12 м. На рис. 2 показано изображение исследуемой области, смоделированное на основе лазерного сканирования. 3D-модель объекта была использована в расчётах на основе программного инструментария Geant4 для описания распространения частиц в веществе и получения ожидаемого потока мюонов в детекторе. Расчётные интенсивности потоков мюонов сравнивались с экспериментальными, полученными с помощью ядерно-эмульсионных детекторов, установленных под землёй ниже уровня исследуемой области. Представлено сравнение результатов модельных расчётов (рис. 3: a) с экспериментальными распределениями дифференциальных мюонных потоков (рис. 3: b), полученными с помощью одного из детекторов, направления обзора которых обозначены узкими конусами на (рис. 2).

Аналогичным методом в настоящее время осуществляются мюонографические исследования архитектурных объектов в Китае (Liu et al. 2023), Греции (Avgitas et al. 2024), Иерусалиме (Benhammou et al. 2025), Египте (Gamal et al. 2025) и других странах. Авторы статьи применяют метод мюонографии для изучения историко-культурных объектов России с 2017 г. За это время разработан уникальный авторский метод анализа эмульсионных данных, описанный ниже.

Материалы и методы исследования

Высокая проникающая способность мюонной компоненты вторичного космического излучения определяется физическими свойствами этих частиц. Мюоны не являются ядерно-активными частицами, т. е. не участвуют в сильных взаимодействиях и теряют энергию на ионизационные потери. Относительно небольшие потери энергии мюонов на тормозное излучение обусловлены их большой массой покоя, в 207 раз превышающей массу покоя электрона. Несмотря на то, что мюоны являются нестабильными частицами, их пробег до распада, в зависимости от энергии, может превышать толщину остаточного слоя атмосферы от уровня генерации мюонов до поверхности Земли. Даже при сравнительно умеренной энергии мюон может не только преодолеть земную атмосферу, но и проникнуть в грунт — мюоны космического происхождения с энергиями до 10 ТэВ регистрируются в подземных лабораториях на глубинах до 2 км (см., например: Agafonova et al. 2018). Пробег мюонов до поглощения в веществе скальных пород, сравнимый с масштабом исследуемых объектов, делает их уникальным агентом для мюонографии. Поскольку спектр космических мюонов простирается по крайней мере до сотен ТэВ, то даже для таких протяженных объектов, как горные массивы, существуют мюоны, способные пройти их насквозь.

При пересечении некоторого слоя вещества (геологических пород или строительных материалов) происходит частичное поглощение мюонного потока, степень которого зависит от пройденного количества вещества. Различная степень ослабления потоков атмосферных мюонов, проходящих через объект с разных направлений, позволяет определять местоположение и размеры неоднородностей внутри объекта в этих направлениях. В эксперименте непоглощённая доля потока регистрируется детекторами, позволяющими измерять угловые характеристики траекторий мюонов.

Из всех детекторов, применяемых в мюонографии, наилучшим пространственным разрешением обладают эмульсионные трековые детекторы (1 мкм, что на расстоянии 1 км позволяет распознать неоднородность размером 15 м). Авторы статьи первыми в России проводят мюонографические эксперименты на основе таких детекторов. Фотографическая ядерная эмульсия является высокочувствительным интегральным детектором ионизирующего излучения (Ariga et al. 2020). Заряженная частица, попадающая в детектор, оставляет в ядерной эмульсии след засвеченных зёрен галоидного серебра, который после химической обработки виден под микроскопом как цепочка отдельных точек или сплошная линия, в зависимости от величины заряда частицы (рис. 4: a). Эмульсионный трековый детектор представляет собой сборку из плёнок с нанесёнными слоями ядерной эмульсии площадью до нескольких квадратных сантиметров, плотно упакованных в светонепроницаемые пакеты и закреплённых в специальном каркасе (рис. 4: b). Эти автономные модульные, легко перемещаемые устройства во время экспозиции не требуют присутствия оператора и дополнительной инфраструктуры, что позволяет им успешно конкурировать с электронными детекторами, применяемыми в мюонографии.

Сканирование облучённой ядерной эмульсии осуществляется на автоматизированном измерительном комплексе ПАВИКОМ (Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМплекс) (Alexandrov et al. 2022). Высокотехнологичное оборудование комплекса предназначено для обработки экспериментальных данных, полученных с помощью различных трековых детекторов, в первую очередь ядерной фотоэмульсии, позволяет проводить безостановочное сканирование и обработку изображений в режиме реального

времени. Для анализа экспериментальных мюонографических данных в ядерной фотоэмульсии используется сканирующая станция нового поколения ПАВИКОМ-3 (рис. 5), с помощью которой в онлайн режиме производится оцифровка изображений и их первичная обработка. В автоматическом режиме оцифрованные изображения траекторий заряженных частиц, зафиксированные высокоскоростной CMOS-камерой, передаются в вычислительную систему, программное обеспечение которой осуществляет поиск, идентификацию и анализ треков, а также восстановление их пространственного положения.

Первым архитектурным объектом, исследованным авторами методом мюонографии с применением ядерно-эмульсионных детекторов, стало древнее строение в цитадели Нарын-Кала (г. Дербент) (Abiev et al. 2019; Alexandrov et al. 2021a). Объект представляет собой подземное крестово-купольное сооружение из ракушечника высотой 10 м, снаружи полностью засыпанное грунтом и полое внутри. С помощью полученных данных удалось определить толщину стен этого, предположительно, раннехристианского храма. Полученный результат продемонстрировал применимость ядерно-эмульсионных детекторов разработанной конструкции и правильность подхода к постановке полномасштабного мюонографического эксперимента.

Дальнейшее освоение и развитие в России метода мюонографии в историко-археологической области было осуществлено в эксперименте по изучению объектов на территории Свято-Троицкого Данилова монастыря в г. Переславле-Залесском (Ярославская область) (Konovalova et al. 2021; Alexandrov et al. 2021b), целью которого был поиск скрытых уплотнений и пустот внутри строений и под землёй на территории монастыря. Для подтверждения достоверности авторской методики впервые в практике мюонографических исследований была проведена идентификация визуально проверяемых объектов (архитектурных элементов и фрагментов зданий).

Полученные экспериментальные данные позволили обнаружить ряд особенностей скрытой структуры в зданиях и на прилегающей территории. В замурованной части подвалов одной из церквей были обнаружены две ранее неизвестные комнаты и значительное уплотнение, выявлен неизвестный воздуховод. Под землёй на территории монастыря обнаружены три полости (возможно, древние крипты), происхождение и назначение которых является предметом дальнейших археологических изысканий. Результаты мюонографических экспериментов в крепости Нарын-Кала и Свято-Троицком Даниловом монастыре были отмечены престижной российской академической премией имени митрополита Московского и Коломенского Макария по естественным наукам за 2022 г.

Необходимо отметить, что в мюонографических исследованиях объектов со сложной геометрией часто возникает задача построения реалистичной 3D-модели исследуемого объекта, которая обычно используется для сравнительного анализа зарегистрированных угловых распределений с модельными распределениями. Древние монастыри, где в поле зрения детекторов попадает множество «теней» от близлежащих строений, относятся именно к таким объектам. Кроме того, они имеют охранный статус объектов культурного наследия, что ограничивает возможности по установке детекторов. В частности, этот статус не позволяет нарушать целостность зданий и грунта для помещения детекторов на оптимальную глубину ниже уровня наблюдения. Для решения этих проблем разработана оригинальная авторская методика, основанная на (а) подтверждении достоверности созданных алгоритмов анализа данных путём распознавания визуально проверяемых элементов и (б) детальном анализе данных по потокам мюонов, распространяющихся в окологоризонтальном направлении. Таким образом, в дополнение к традиционному сравнению экспериментальных результатов с результатами моделирования прохождения потоков мюонов через объект, анализируются полученные угловые распределения потоков мюонов в детекторах, достоверность физических выводов тестируется на визуально проверяемых объектах.

Обработка и анализ данных осуществляется многоступенчатым методом, максимально использующим информацию об окологоризонтальной составляющей мюонного излучения.

Суть аналитического метода, подробно описанного в (Alexandrov et al. 2024), заключается в поиске локальных экстремумов угловых распределений треков, соответствующих особенностям плотности в выделенном направлении, и пересечений этих экстремумов, зарегистрированных несколькими детекторами, установленными в разных точках и направленными на изучаемую область. Все детекторы объединены общей системой координат, в которой положения детекторов с сантиметровой точностью определяются в ходе выполнения съёмки дроном, а также геодезической и лидарной съёмки. Для каждого детектора строятся угловые распределения треков зарегистрированных мюонов и определяется количество треков в элементе телесного угла $d\varphi d\theta$, где зенитный угол θ траектории частицы отсчитывается относительно оси Z, направленной перпендикулярно плоскости земной поверхности, а φ — азимутальный угол в этой плоскости. При переборе всех возможных направлений по θ и φ определяются положения локальных экстремумов по количеству зарегистрированных частиц в элементе $d\varphi d\theta$ последовательно по φ для каждого заданного θ.

При работе с окологоризонтальными мюонными потоками добавляется третья переменная — высота точки над уровнем моря. Исследуемое пространство условно разбивается на элементы объёма — кубики со стороной 0,5—1 м. В случае обнаружения локального экстремума углового распределения мюонов в интервале направлений $(\varphi, \varphi+\Delta\varphi)$ и $(\theta, \theta+\Delta\theta)$, соответствующие этому направлению от данного детектора элементы объёма наносятся на карту экстремумов. На итоговую презентационную карту наносятся точки пересечения локальных максимумов по φ и θ со слоями грунта толщиной 1 метр между фиксированными высотами над уровнем моря. Далее, с учётом высоты, строятся двумерные картины максимумов (минимумов) потоков мюонов с шагом 0,5—1 м по высоте. Наиболее вероятные расположения скрытых полостей находятся там, где пересекаются локальные максимумы от наибольшего числа детекторов. Пример результатов обработки данных согласно этому алгоритму представлен на рис. 6.

Результаты и обсуждение

В Свято-Успенском Псково-Печерском монастыре указанным методом были выявлены неизвестные ранее подземные полости значительных размеров, связанные с галереями пещерного храма (рис 7: a), выделенные на рисунке зелёным цветом. Анализ полученных данных позволил локализовать скрытые аномалии плотности и описать их форму и размеры (рис. 7: b).

В 2024 г. был проведён мюонографический эксперимент на территории Спасо-Каменного Преображенского монастыря, расположенного на острове Каменном на Кубенском озере в Вологодской области РФ. Для проведения основного эксперимента на территории Каменного острова установили 18 эмульсионных детекторов, ориентированных таким образом, чтобы их сектора обзора пересекались в центральной части острова в области разрушенного в середине 1930-х гг. Преображенского собора, где, согласно летописям, может находиться склеп с останками почившего в 1533 г. опального предстоятеля Русской церкви митрополита Варлаама (рис. 8). В результате обработки данных эксперимента были обнаружены ранее неизвестные объекты — подземные полости под разрушенным собором в районе алтаря, возможно, связанные с местом захоронения митрополита Варлаама, несколько полостей под стенами собора и рядом с ним и др.

На основе метода мюонографии авторами осуществлена серия экспериментов, направленных на изучение историко-архитектурных объектов. Эти работы продемонстрировали практическую применимость мюонографии на основе эмульсионных детекторов для изучения археологических объектов и возможность получения уникальных научных результатов. Экспериментальный опыт позволил разработать и усовершенствовать методы проведения исследований, обработки и анализа данных, определить факторы, влияющие на статические и динамические эффекты и создать алгоритм визуализации внутренней структуры изучаемых объектов.

Достигнутый уровень исследований обусловлен рядом факторов:

1. Конструкции детекторов и методы их сборки непрерывно совершенствуются. Доработка конструкций детекторов производится с учётом особенностей каждого эксперимента. Количество используемых детекторов должно обеспечить надёжный «просмотр» исследуемых участков. Расположение детекторов на объекте определяется с помощью модельных расчётов.

2. Пространственная привязка детекторов к единой наземной системе координат осуществляется с помощью геодезической и лидарной съёмки, что обеспечивает сантиметровую точность привязки, необходимую для согласования показаний детекторов и 3D-реконструкции исследуемых участков.

3. Обработка данных детекторов на автоматизированном измерительном комплексе ПАВИКОМ позволяет восстанавливать следы частиц в объёме детектора с высокой точностью. Скорость сканирования эмульсионных плёнок достигает 190 $см^2$/ч.

4. Постоянно разрабатываются и внедряются новые методы анализа данных и визуализации полученных результатов с использованием современных компьютерных технологий.

5. Регистрация визуально проверяемых архитектурных элементов и объектов на исследуемой территории подтверждает обоснованность технических и аналитических решений и достоверность полученных результатов. Разработан метод поиска и оценки размеров аномалий плотности по пересечениям локальных максимумов (минимумов) потоков мюонов, регистрируемых несколькими детекторами.

Накопленный опыт работы и отработанная методика позволяют уверенно планировать новые мюонографические эксперименты. При поддержке университета «Сириус» на 2026 г. запланировано проведение нового мюонографического эксперимента, имеющего большое значение для инфраструктуры Большого Сочи. Запланировано исследование зон трещиноватости в районе оползней на участке горы Бытха (рис. 9), представляющих большую опасность для этого густонаселённого района.

В числе возможных рисков можно отметить следующие:

-разрушается почвенно-растительный покров, что нарушает существующую экосистему;

-потоки грязи, образовавшиеся в результате оползней, приводят к загрязнению естественных и искусственных водоёмов;

- оползневые процессы воздействуют на материнскую геологическую породу, что приводит к нарушению почвообразующих процессов ландшафта и изменению почвенного состава;

- в результате оголения оползнем водоносного горизонта может произойти изменение границ существующих водоёмов и формирование новых, что означает изменение гидрологического режима;

- одним из наиболее опасных последствий оползня может стать разрушение зданий и инфраструктуры жилого сектора. Возникает угроза чрезвычайных ситуаций, представляющих опасность для жизни людей.

В отличие от исследованных ранее объектов, гора Бытха окружена хребтами первичных складчатых дислокаций осадочного чехла Черноморско-Закавказского массива, имеющими существенно большую высоту, чем сама гора, и значительно усложняющих проведение мюонографического эксперимента. Эффективность мюонографии при исследовании аномалий в горном массиве определяется рядом ключевых геологических условий, прежде всего, наличием достаточного контраста плотности между аномалией (разрывные нарушения, зоны трещиноватости, флюидопроводящие каналы, грунтовые воды и зеркала скольжения оползней) и основной породой. Разница плотности должна составлять не менее 5% (Zemskova, Starkov 2015). Так, метод мюонографии позволяет выделить области трещиноватых гранитов с пониженной плотностью в толще массивных базальтов — такой контраст обеспечивает детектируемое изменение потока мюонов, проходящих через аномальную зону.

При меньшем различии в плотности включения и основного материала сигнал может оказаться неразличимым на фоне естественных флуктуаций потока космических мюонов.

В процессе подготовки эксперимента было проведено моделирование сигналов от зондирующих мюонов в детекторах, установленных согласно рис. 9. Если для зданий и промышленных сооружений при создании модели применяются технические чертежи, то для объектов естественного происхождения (горы, холмы, пещеры и т. п.) могут быть использованы топографические данные с последующим построением линий уровня. С помощью топографической карты местности были построены линии уровня, характеризующие рельеф исследуемого склона, что необходимо для оценки интенсивности падающих потоков (рис. 10: a). На рис. 10: b показаны траектории мюонов, приходящих на детектор под углами 2, 4, 6, 8 и 10 градусов к горизонту. Длина пути мюонов в теле горы растёт по мере приближения лучей к горизонту, а плотность потоков и число зарегистрированных частиц, соответственно, уменьшаются. Для определения вероятности поглощения мюона внутри горы, необходимо задать свойства материала (для расчётов принята величина плотности грунта 1,84 г/см^3). Энергетические потери и пробеги мюонов для этого материала взяты из (Groom et al. 2001).

В табл. 1 приведены результаты расчётов для заданных направлений (φ, θ), где L — пробег мюона внутри горы, θ — угол к горизонту, φ — азимутальный угол, Pmin — минимальный импульс, начиная с которого мюоны могут пройти через заданную толщину материала L, F — величина потока мюонов, N — количество мюонов, попавших на детектор площадью 10 × 12 см^2 в течение двух с половиной месяцев. Результаты расчётов свидетельствуют о возможности реализации мюонографического исследования горы Бытха по предложенной схеме.

Ещё одним запланированным мюонографическим экспериментом является исследование погребально-поминального комплекса Каркара, расположенного в 13 км к юго-востоку от одноимённого села в Кегенском районе Алматинской области. На основе объёмной модели изучаемого объекта проведено моделирование прохождения мюонных потоков через коническую структуру, имитирующую курган (Konovalova et al. 2025). Был получен отклик детектора при наличии внутри холма области с плотностью, отличной от плотности основного материала. В качестве материала холма использовался скальный грунт плотностью 2,65 г/см^3; для вещества инородного включения были рассмотрены два варианта, более плотное включение из железа (плотность 7,84 г/см^3) и менее плотное из грунта с пониженной плотностью 2,3 г/см^3. Задача модельного эксперимента заключалась в том, чтобы подтвердить или опровергнуть наличие такой области внутри холма. Согласно полученным результатам моделирования, разность мюонных потоков при наличии инородной сферы и без неё составляет ~7—8%. Поскольку метод мюонографии позволяет зафиксировать разницу потоков, превышающую 5%, в приведённом модельном эксперименте аномалия плотности может быть обнаружена с достаточной достоверностью.

Заключение

Представленный авторский подход к реализации метода мюонографии позволяет с высокой достоверностью изучать такие сложные объекты, как историко-архитектурные памятники, что продемонстрировано в серии исследований объектов культурного наследия на территории России. Как показывают проведённые эксперименты, мюонография на основе эмульсионных детекторов является перспективным техническим решением. Можно отметить следующие преимущества и особенности метода:

- глубина обнаружения аномалий плотности простирается до 2 км. Экспозиция детекторов на объекте может составлять от 7 дней до 6 месяцев (для экспериментов глубоко под землёй). Чем толще слой проникновения, тем более длительная экспозиция требуется;
- пространственное разрешение метода составляет 1 мкм (это означает, что на расстоянии 1 км можно различить инородное включение размером 15 м);
- разрешающая способность по плотности $d\rho/\rho \sim 5\%$;

- эффективный угол обнаружения ± 45°;
- диапазон рабочих температур ± 30°C.

На сегодняшний день авторы статьи — единственные в России, кто успешно осуществляет крупномасштабные мюонографические исследования с применением ядерно-эмульсионных детекторов. Разработаны и успешно применяются новые авторские мюонографические решения, касающиеся методов автоматизированного сканирования слоев ядерных фотоэмульсий, инновационных оригинальных алгоритмов распознавания скрытой трёхмерной структуры исследуемых объектов и подтверждения достоверности полученных результатов. В целом круг задач, для решения которых может применяться метод мюонографии, очень широк (см., например: Holma et al. 2025; Hong et al. 2025; Lechmann et al. 2021; Oláh, Tanaka 2025; Rabaglia et al. 2025; Surányi et al. 2025). Это мониторинг крупных природных объектов (вулканов, ледников, геологических плит, карстовых пещер), неразрушающий контроль промышленных и архитектурных объектов (шахт и рудников, установок ядерно-энергетического комплекса, производственных и строительных объектов, скрытых от прямого наблюдения фрагментов зданий), контроль состояния пожароопасных углепородных отвалов, анализ сейсмических процессов и др. Метод может быть использован как перспективное дополнение к традиционным геофизическим методам разведки полезных ископаемых. Предложенная мюонографическая методика на основе эмульсионных детекторов позволяет с высокой степенью достоверности изучать самые сложные объекты различной природы.

Таблица 1. **Результаты расчётов количества мюонов, попадающих на детектор площадью 10×12 см² в течение двух с половиной месяцев.**

L (м)	420	515	610	830	1050
θ (град)	10	8	6	4	2
Pmin (ГэВ/c)	211	270	334	487	690
F ($м^2$ с ср)$^{-1}$	0,02	0,013	0,009	0,005	0,0027
Количество мюонов N	5100	3300	2900	1280	700

Литература

Abiev et al. 2019: Abiev A., Bagulya A., Chernyavsky M., Dashkina A., Dimitrienko A. et al. 2019. Muon radiography method for non-invasive probing an archaeological site in the Naryn-Kala citadel. *Appl. Sci.* 9 (10), Art. 2040.

Agafonova et.al. 2018: Agafonova N.Yu., Ashikhmin V.V., Dobrynina E.A., Enikeev R.I., Malgin A.S. et.al. 2018. LVD Experiment: 25 Years of Operation. *Phys. Atom. Nuclei.* 81, 95—104.

Alexandrov et al. 2021a: Alexandrov A.B., Chernyavsky M.M., Galkin V.I., Goncharova L.A., Grachev V.M., et al. 2021. Muography of large natural and industrial objects. *Phys. At. Nucl.* 84 (6), 1114—1120.

Alexandrov et al. 2021b: Alexandrov A.B., Vasina S.G., Galkin V.I., Goncharova L.A., Konovalov A.S. et. al. 2021. Search for hidden rooms in the Holy Trinity Danilov Monastery by the muon radiography method. *Phys. At. Nucl.* 84 (6), 855—859.

Alexandrov et al. 2022: Alexandrov A., Konovalova N., Okateva N., Polukhina N., Starkov N., Shchedrina T. 2022. Upgrade and new applications of the automated high-tech scanning facility PAVICOM for data processing of track detectors. *Measurement* 187, Art. 110244.

Alexandrov et al. 2024: Alexandrov A., Anokhina A., Vasina S., Gippius A., Gorbunov S., et al. 2024. Principles of data processing of the muographic experiment in the cave complex of Pskovo-Pechersky Monastery. *Phys. At. Nucl.* 87, 718—731.

Alvarez et al. 1970: Alvarez L.W., Anderson J.A., Bedwei F.E., Burkhard J., Fakhry A. et al. 1970. Search for hidden chambers in the pyramids: The structure of the second pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption. *Science* 167, 832—839.

Ariga et al. 2020: Ariga A., Ariga T., De Lellis G., Ereditato A., Niwa K. 2020. Nuclear Emulsions. In: Fabjan C., Schopper H. (eds.). *Particle Physics Reference Library. Vol. 2: Detectors for Particles and Radiation*. Springer, Cham., 383—438.

Avgitas et al. 2024: Avgitas T., Elles S., Goy C., Karyotakis Y., Marteau J. 2024. Muography applied to archaeology: case study of a small size Macedonian Tumulus. *ArcheoSciences* 48 (1), 7—15.

Benhammou et al. 2025: Benhammou Y., Etzion E., Gadot Y., Lipschits O., Mizrachi G. et al. 2025. First demonstration of underground muon imaging at an archaeological site in ancient Jerusalem. *J. Appl. Phys*. 138, Art. 084504.

Bonechi et al. 2020: Bonechi L., D'Alessandro R., Giammanco A. 2020. Atmospheric muons as an imaging tool. *Rev. Phys*. 5, Art. 100038.

Bonomi et al. 2020: Bonomi G., Checchia P., D'Errico M., Pagano D, Saracino G. 2020. Applications of cosmic-ray muons. *Prog. Part. Nucl. Phys*. 112, Art. 103768.

Cimmino L. 2021. Principles and perspectives of radiographic imaging with muons. *J. Imaging* 7 (12), Art. 253.

Cimmino et al. 2019: Cimmino L., Baccani G., Noli P., Amato L., Ambrosino F. et al. 2019. 3D muography for the search of hidden cavities.*Sci. Rep*.9, Art. 2974.

El-Qady et al. 2019: El-Qady G., Metwaly M., Drahor M.G. 2019. Geophysical Techniques Applied in Archaeology. In: El-Qady G., Metwaly M. (eds.) *Archaeogeophysics, Natural Science in Archaeology*. Springer International Publishing, Cham, 1—25.

Gamal et al. 2025: Gamal M., Aly S., Geeraerts D., Hecht A., Kouzes R. et al. 2025. The ScIDEP muon radiography project at the Egyptian Pyramid of Khafre. *J. Appl. Phys*.138, Art. 04490.

Groom et al. 2001: Groom D.E., Mokhov N.V., Striganov S.I. 2001. Muon stopping power and range tables 10 MeV-100 TeV. In: *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 78, 183—356.

Holma et al. 2025: Holma M., Balázs L., Surányi G., Demők S., Kuusiniemi, P. 2025. Application of muon tomography in bauxite exploration. *J. Appl. Phys*.138, Art. 024903.

Hong et al. 2025: Hong Y., Al Moussawi M., Ambrosino F., Anastasio A., Basnet S., et al. 2025. Updates on MURAVES Project at Mt. Vesuvius. *J. Appl. Phys*. 138, Art. 064906.

Konovalova et al. 2021: Konovalova N.S., Konovalov A.S., Okateva N.M., Starkov N.I., Shchedrina T.V. 2021. Exploration of underground structures in the Holy Trinity Danilov Monastery by muon radiography method. *Bull. Lebedev Phys. Inst*. 48(6), 175—180.

Konovalova et al. 2025: Konovalova N.S., Okateva N.M., Sadykov Z.T., Starkova E.N. 2025. Simulation of a Muography Experiment on Studying the Kagan-Princely Type Monument. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 52 (7), 301—307.

Lagrange et al. 2025: Lagrange M., Al Moussawi M., Boone M., De Kock T., De Roy J. et al. 2025. Muontomography for cultural heritage objects. *J. Appl. Phys*. 138, Art. 104902.

Lechmann et al. 2021: Lechmann A., Mair D., Ariga A., Ariga T., Ereditato A., et al. 2021. Muon tomography in geoscientific research — A guide to best practice. *Earth-Sci. Rev*. 222, Art. 103842.

Liu et al. 2023: Li G., Luo, X., Tian Y., Yao K., Niu F. et al. 2023. High-precision muography in archaeogeophysics: A case study on Xi'an defensive walls. *J. Appl. Phys*. 133, Art. 014901.

Morishima et al. 2017: Morishima K., Kuno M., Nishio A., Kitagawa N., Manabe Y. et al. 2017. Discovery of a big void in Khufu's pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature* 552, 386—390.

Oláh et al. 2022: Oláh L., Tanaka H., Varga D. (eds.). 2022. Muography: Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles, Geophysical Monograph Series. Wiley, Hoboken, NJ.

Oláh L., Tanaka H.K.M. 2025. Toward joint muography and ground deformation monitoring for volcanic unrest assessment. *J. Appl. Phys*.138, Art. 060701.

Rabaglia et al. 2025: Rabaglia, S., Cervelli, A., Sioli, M. 2025. A new detector for muography applied to glaciers monitoring. *J. Appl. Phys*. 138, Art. 074902.

Saracino et al. 2019: Saracino G., Ambrosino F., Bonechi V., Cimmino L., D'Alessandro R. et al. 2019. Applications of muon absorption radiography to the fields of archaeology and civil engineering. *Philos. Trans. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci*.377, Art. 20180057.

Surányi et al. 2025: Surányi G., Varga D., Hamar G., Nyitrai G., Balázs L. et al. 2025. Underground muography measurements by the HUN-REN Wigner Research Centre for Physics. *J. Appl. Phys*. 138, 064903.

Tioukov et al. 2023: Tioukov V., Morishima K., Leggieri C., Capriuoli F., Kitagawa N. et al. 2023. Hidden chamber discovery in the underground Hellenistic necropolis of Neapolis by muography. *Sci. Rep*. 13, Art. 5438.

Wetzel R. 2017. ScanPyramids Uses 3D Scanning and Virtual Reality to Provide Immersive Learning Experience. URL: https://3dprint.com/194068/scanpyramids-learning-experience/ (дата обращения 19.01.2026).

Zemskova S.G., Starkov N.I. 2015. Methodical notes on the use of cosmic muons in radiography. *Bull. Lebedev Phys. Inst*. 42(3), 37—42.

References

Abiev et al. 2019: Abiev, A., Bagulya, A., Chernyavsky, M., Dashkina, A., Dimitrienko, A. et al. 2019. Muon radiography method for non-invasive probing an archaeological site in the Naryn-Kala citadel. *Appl. Sci.* 9 (10), Art. 2040.

Agafonova et.al. 2018: Agafonova, N.Yu., Ashikhmin, V.V., Dobrynina, E.A., Enikeev, R.I., Malgin, A.S. et.al. 2018. LVD Experiment: 25 Years of Operation. *Phys. Atom. Nuclei.* 81, 95—104.

Alexandrov et al. 2021a: Alexandrov, A.B., Chernyavsky, M.M., Galkin, V.I., Goncharova, L.A., Grachev, V.M., et al. 2021. Muography of large natural and industrial objects. *Phys. At. Nucl.* 84 (6), 1114—1120.

Alexandrov et al. 2021b: Alexandrov, A.B., Vasina, S.G., Galkin, V.I., Goncharova, L.A., Konovalov, A.S. et. al. 2021. Search for hidden rooms in the Holy Trinity Danilov Monastery by the muon radiography method. *Phys. At. Nucl.* 84 (6), 855—859.

Alexandrov et al. 2022: Alexandrov, A., Konovalova, N., Okateva, N., Polukhina, N., Starkov, N., Shchedrina, T. 2022. Upgrade and new applications of the automated high-tech scanning facility PAVICOM for data processing of track detectors. *Measurement* 187, Art. 110244.

Alexandrov et al. 2024: Alexandrov, A., Anokhina, A., Vasina, S., Gippius, A., Gorbunov, S., et al. 2024. Principles of data processing of the muographic experiment in the cave complex of Pskovo-Pechersky Monastery. *Phys. At. Nucl.* 87, 718—731.

Alvarez et al. 1970: Alvarez, L.W., Anderson, J.A., Bedwei, F.E., Burkhard, J., Fakhry, A. et al. 1970. Search for hidden chambers in the pyramids: The structure of the second pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption. *Science* 167, 832—839.

Ariga et al. 2020: Ariga, A., Ariga, T., De Lellis, G., Ereditato, A., Niwa, K. 2020. Nuclear Emulsions. In: Fabjan, C., Schopper, H. (eds.). *Particle Physics Reference Library. Vol. 2: Detectors for Particles and Radiation*. Springer, Cham., 383—438.

Avgitas et al. 2024: Avgitas, T., Elles, S., Goy, C., Karyotakis, Y., Marteau, J. 2024. Muography applied to archaeology: case study of a small size Macedonian Tumulus. *ArcheoSciences* 48 (1), 7—15.

Benhammou et al. 2025: Benhammou, Y., Etzion, E., Gadot, Y., Lipschits, O., Mizrachi, G. et al. 2025. First demonstration of underground muon imaging at an archaeological site in ancient Jerusalem. *J. Appl. Phys.* 138, Art. 084504.

Bonechi et al. 2020: Bonechi, L., D'Alessandro, R., Giammanco, A. 2020. Atmospheric muons as an imaging tool. *Rev. Phys.* 5, Art. 100038.

Bonomi et al. 2020: Bonomi, G., Checchia, P., D'Errico, M., Pagano, D, Saracino, G. 2020. Applications of cosmic-ray muons. *Prog. Part. Nucl. Phys.* 112, Art. 103768.

Cimmino, L. 2021. Principles and perspectives of radiographic imaging with muons. *J. Imaging* 7 (12), Art. 253.

Cimmino et al. 2019: Cimmino, L., Baccani, G., Noli, P., Amato, L., Ambrosino, F. et al. 2019. 3D muography for the search of hidden cavities.*Sci. Rep.*9, Art. 2974.

El-Qady et al. 2019: El-Qady, G., Metwaly, M., Drahor, M.G. 2019. Geophysical Techniques Applied in Archaeology. In: El-Qady, G., Metwaly, M. (eds.) *Archaeogeophysics, Natural Science in Archaeology*. Springer International Publishing, Cham, 1—25.

Gamal et al. 2025: Gamal, M., Aly, S., Geeraerts, D., Hecht, A., Kouzes, R. et al. 2025. The ScIDEP muon radiography project at the Egyptian Pyramid of Khafre. *J. Appl. Phys.*138, Art. 04490.

Groom et al. 2001: Groom, D.E., Mokhov, N.V., Striganov, S.I. 2001. Muon stopping power and range tables 10 MeV-100 TeV. In: *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 78, 183—356.

Holma et al. 2025: Holma, M., Balázs, L., Surányi, G., Demők, S., Kuusiniemi, P. 2025. Application of muon tomography in bauxite exploration. *J. Appl. Phys.*138, Art. 024903.

Hong et al. 2025: Hong, Y., Al Moussawi, M., Ambrosino, F., Anastasio, A., Basnet, S., et al. 2025. Updates on MURAVES Project at Mt. Vesuvius. *J. Appl. Phys.* 138, Art. 064906.

Konovalova et al. 2021: Konovalova, N.S., Konovalov, A.S., Okateva, N.M., Starkov, N.I., Shchedrina, T.V. 2021. Exploration of underground structures in the Holy Trinity Danilov Monastery by muon radiography method. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 48(6), 175—180.

Konovalova et al. 2025: Konovalova, N.S., Okateva, N.M., Sadykov, Z.T., Starkova, E.N. 2025. Simulation of a Muography Experiment on Studying the Kagan-Princely Type Monument. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 52 (7), 301—307.

Lagrange et al. 2025: Lagrange, M., Al Moussawi, M., Boone, M., De Kock, T., De Roy, J. et al. 2025. Muontomography for cultural heritage objects. *J. Appl. Phys.* 138, Art. 104902.

Lechmann et al. 2021: Lechmann, A., Mair, D., Ariga, A., Ariga, T., Ereditato, A., et al. 2021. Muon tomography in geoscientific research — A guide to best practice. *Earth-Sci. Rev*. 222, Art. 103842.

Liu et al. 2023: Liu, G., Luo, X., Tian, Y., Yao, K., Niu, F. et al. 2023. High-precision muography in archaeogeophysics: A case study on Xi'an defensive walls. *J. Appl. Phys*. 133, Art. 014901.

Morishima et al. 2017: Morishima, K., Kuno, M., Nishio, A., Kitagawa, N., Manabe, Y. et al. 2017. Discovery of a big void in Khufu's pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature* 552, 386—390.

Oláh et al. 2022: Oláh, L., Tanaka, H., Varga, D. (eds.). 2022. Muography: Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles, Geophysical Monograph Series. Wiley, Hoboken, NJ.

Oláh, L., Tanaka, H.K.M. 2025. Toward joint muography and ground deformation monitoring for volcanic unrest assessment. *J. Appl. Phys*.138, Art. 060701.

Rabaglia et al. 2025: Rabaglia, S., Cervelli, A., Sioli, M. 2025. A new detector for muography applied to glaciers monitoring. *J. Appl. Phys*. 138, Art. 074902.

Saracino et al. 2019: Saracino, G., Ambrosino, F., Bonechi, V., Cimmino, L., D'Alessandro, R. et al. 2019. Applications of muon absorption radiography to the fields of archaeology and civil engineering. *Philos. Trans. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci*.377, Art. 20180057.

Surányi et al. 2025: Surányi, G., Varga, D., Hamar, G., Nyitrai, G., Balázs, L. et al. 2025. Underground muography measurements by the HUN-REN Wigner Research Centre for Physics. *J. Appl. Phys*. 138, 064903.

Tioukov et al. 2023: Tioukov, V., Morishima, K., Leggieri, C., Capriuoli, F., Kitagawa, N. et al. 2023. Hidden chamber discovery in the underground Hellenistic necropolis of Neapolis by muography. *Sci. Rep*. 13, Art. 5438.

Wetzel, R. 2017. ScanPyramids Uses 3D Scanning and Virtual Reality to Provide Immersive Learning Experience. Available at: https://3dprint.com/194068/scanpyramids-learning-experience/ (accessed 19.01.2026).

Zemskova, S.G., Starkov, N.I. 2015. Methodical notes on the use of cosmic muons in radiography. *Bull. Lebedev Phys. Inst*. 42(3), 37—42.

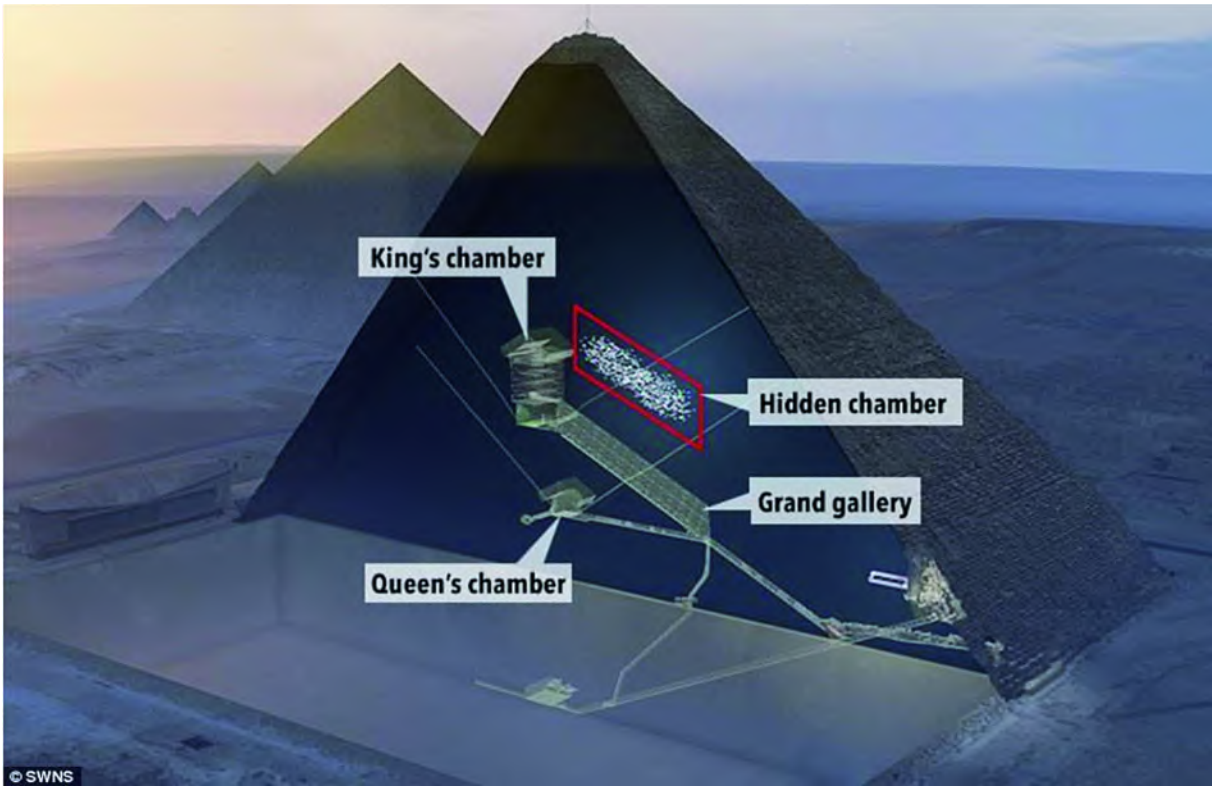


Рис. 1. Изображение ранее неизвестной полости внутри пирамиды Хеопса, обнаруженной методом мюонографии (по Wetzel 2017).

Fig. 1. Image of a previously unknown cavity inside the Pyramid of Khufu discovered using muography (after Wetzel 2017).

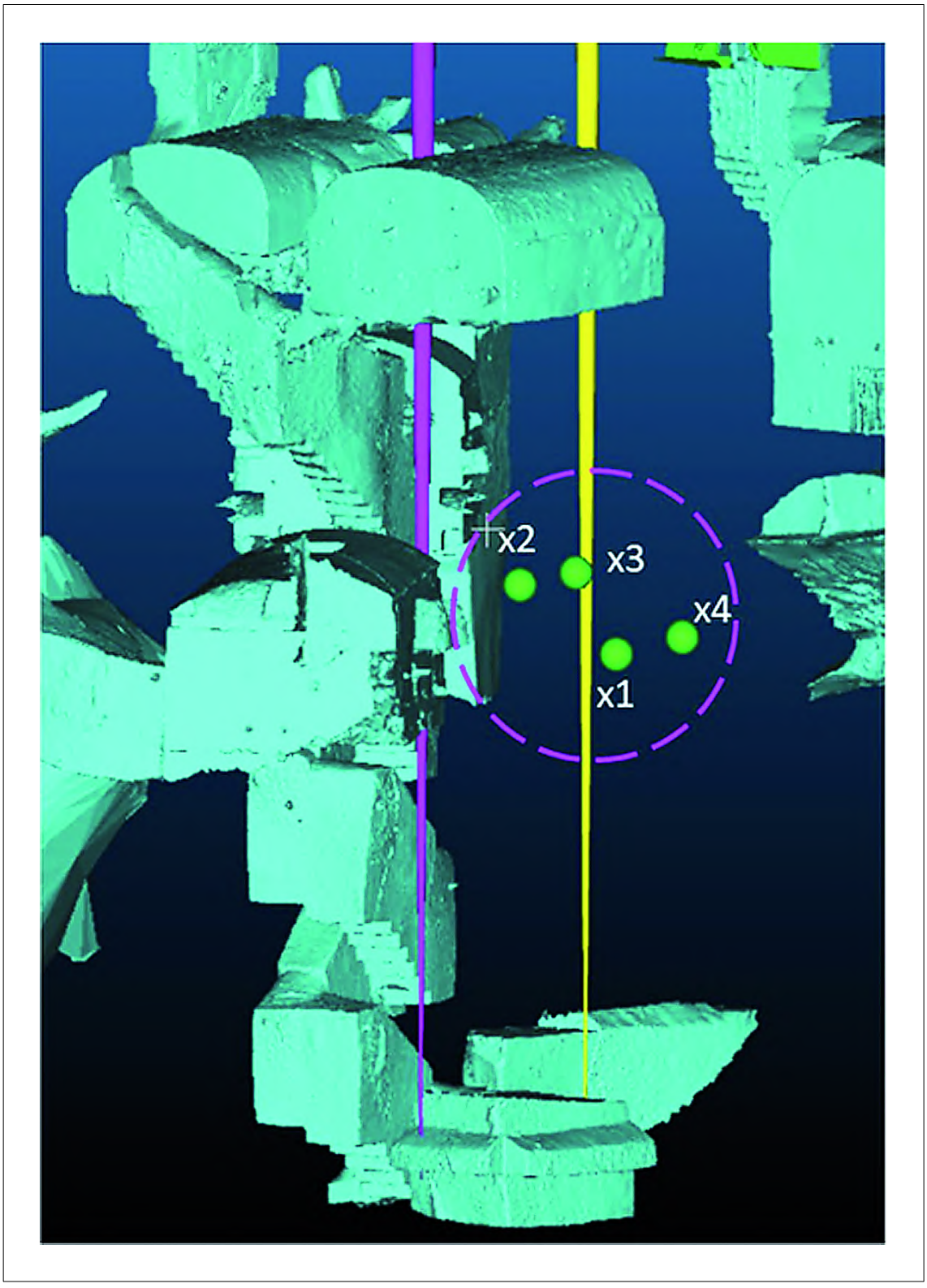


Рис. 2. 3D-модель исследуемых подземных полостей Неаполя, полученная с помощью лазерного сканирования (x1—x4 — реперные точки для координатной привязки). Цветные конусы показывают направление обзора двух детекторов.

Fig. 2. 3D model of the underground cavities under investigation in Naples, obtained using laser scanning (x1–x4 — control points for georeferencing). The colored cones indicate the viewing directions of the two detectors.

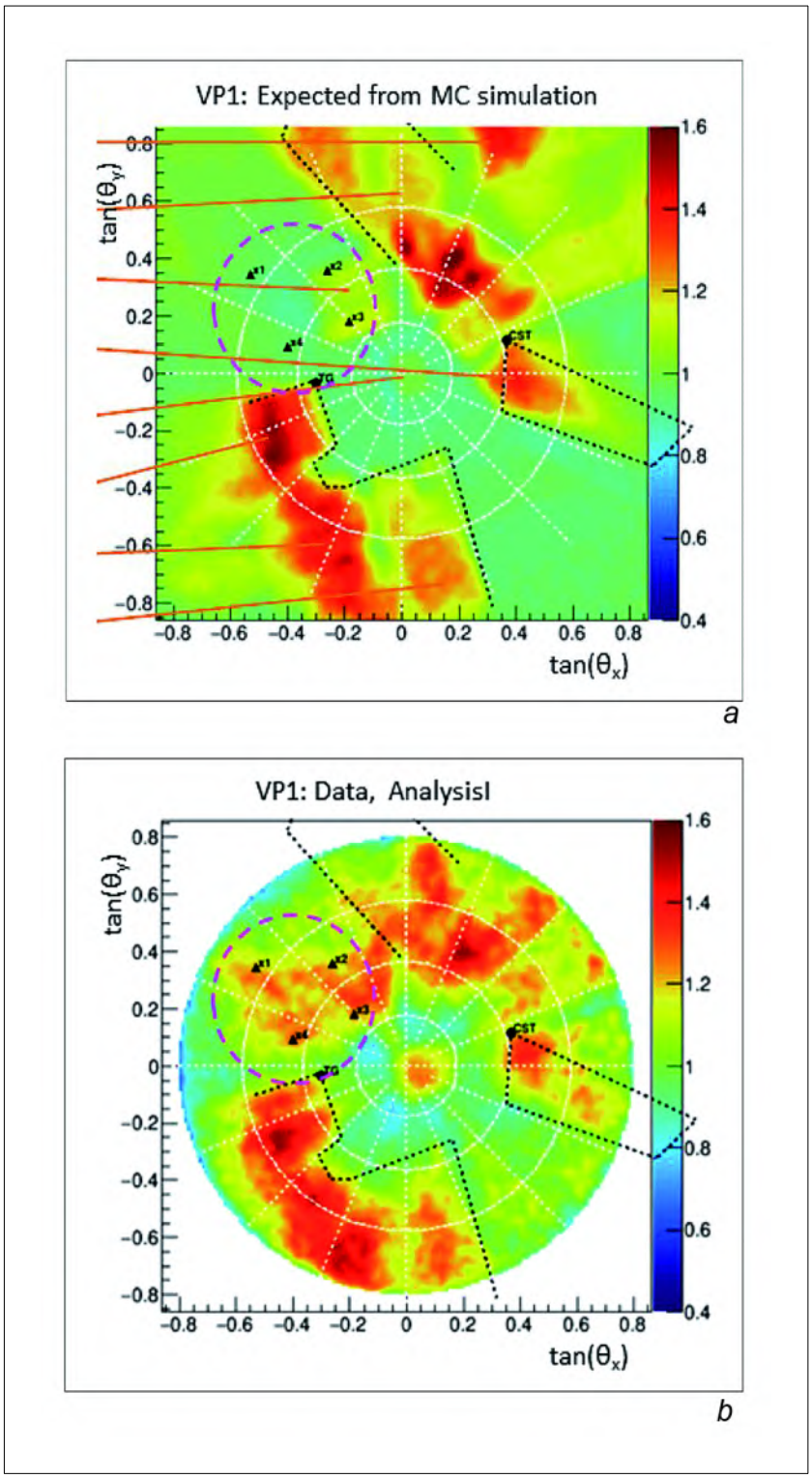


Рис. 3. Сравнение результатов модельных расчётов с результатами мюонографии (по Tioukov et al. 2023)**:** *a* — результаты моделирования; *b* — плотность вертикальных мюонных потоков, зарегистрированных одним из детекторов в эксперименте по изучению подземных полостей Неаполя.

Fig. 3. Comparison of simulation results with muographic measurements (after Tioukov et al. 2023)**:** *a* — simulation results; *b* — vertical muon flux density recorded by one of the detectors during the experiment investigating underground cavities in Naples.

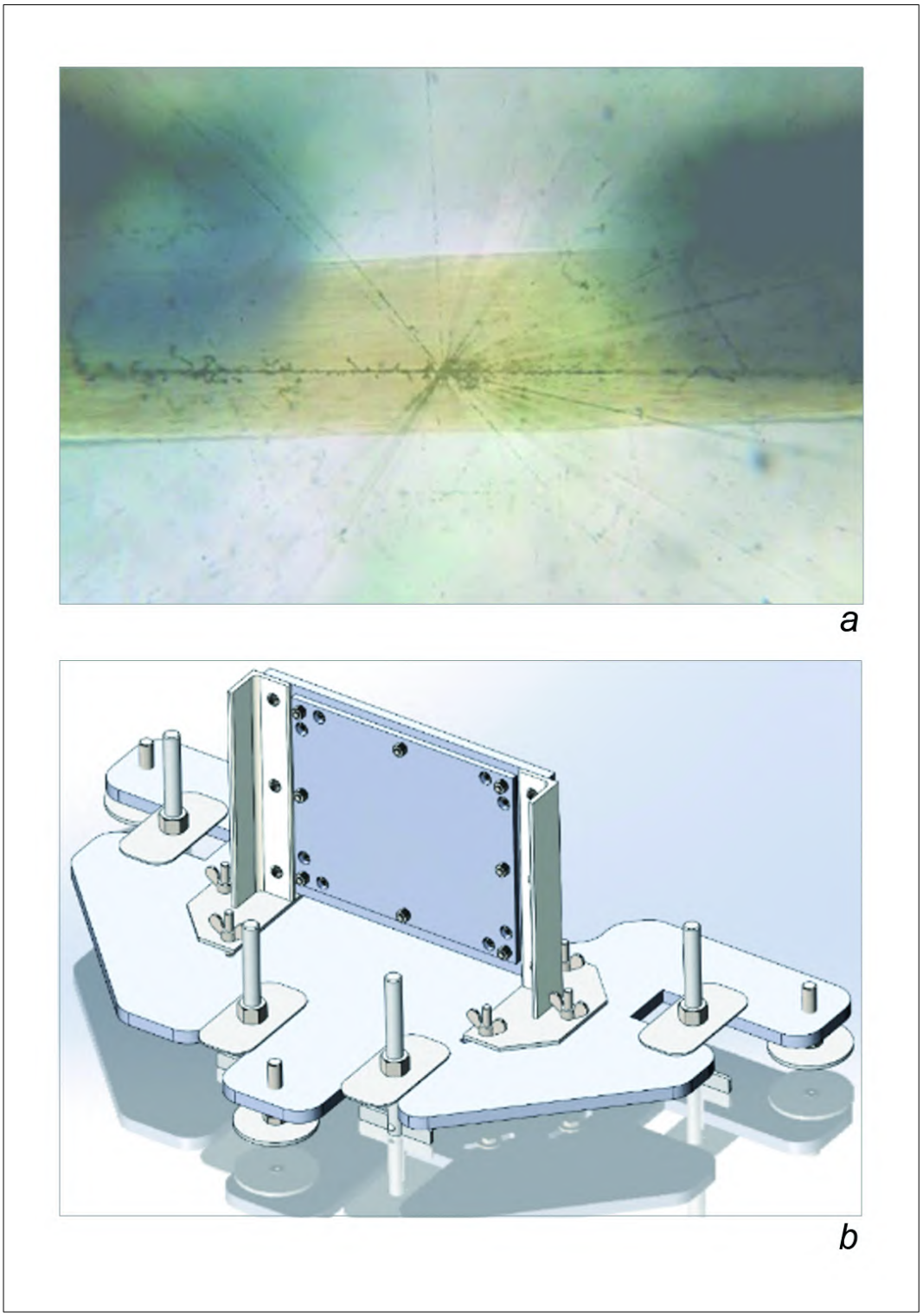


Рис. 4. Ядерно-эмульсионный детектор: *a* — совмещенные в одном масштабе фотографии взаимодействия релятивистского ядра серы в ядерной эмульсии и человеческого волоса толщиной 60 мкм, полученные с помощью микроскопа и цифровой фотокамеры; *b* — одна из конструкций ядерно-эмульсионного детектора для мюонографии, размер используемого эмульсионного слоя 10 × 12,5 см.

Fig. 4. Nuclear emulsion detector: *a* — photographs of the interaction of a relativistic sulfur nucleus in a nuclear emulsion and a human hair 60 μm thick, shown at the same scale and obtained using a microscope and a digital camera; *b* — one of the nuclear emulsion detector designs used for muography, with an emulsion layer measuring 10 × 12.5 cm.

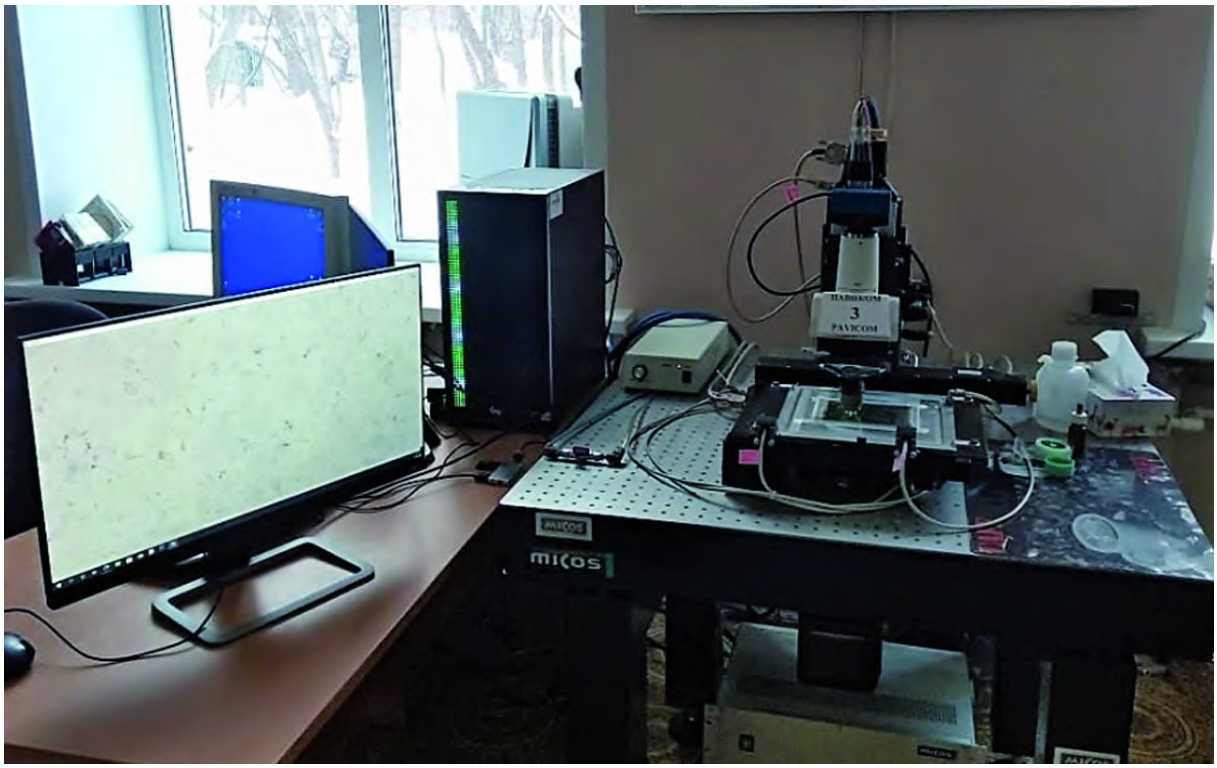


Рис. 5. Установка ПАВИКОМ-3 для сканирования ядерно-эмульсионных плёнок.

Fig. 5. PAVICOM-3 system for scanning nuclear emulsion films.

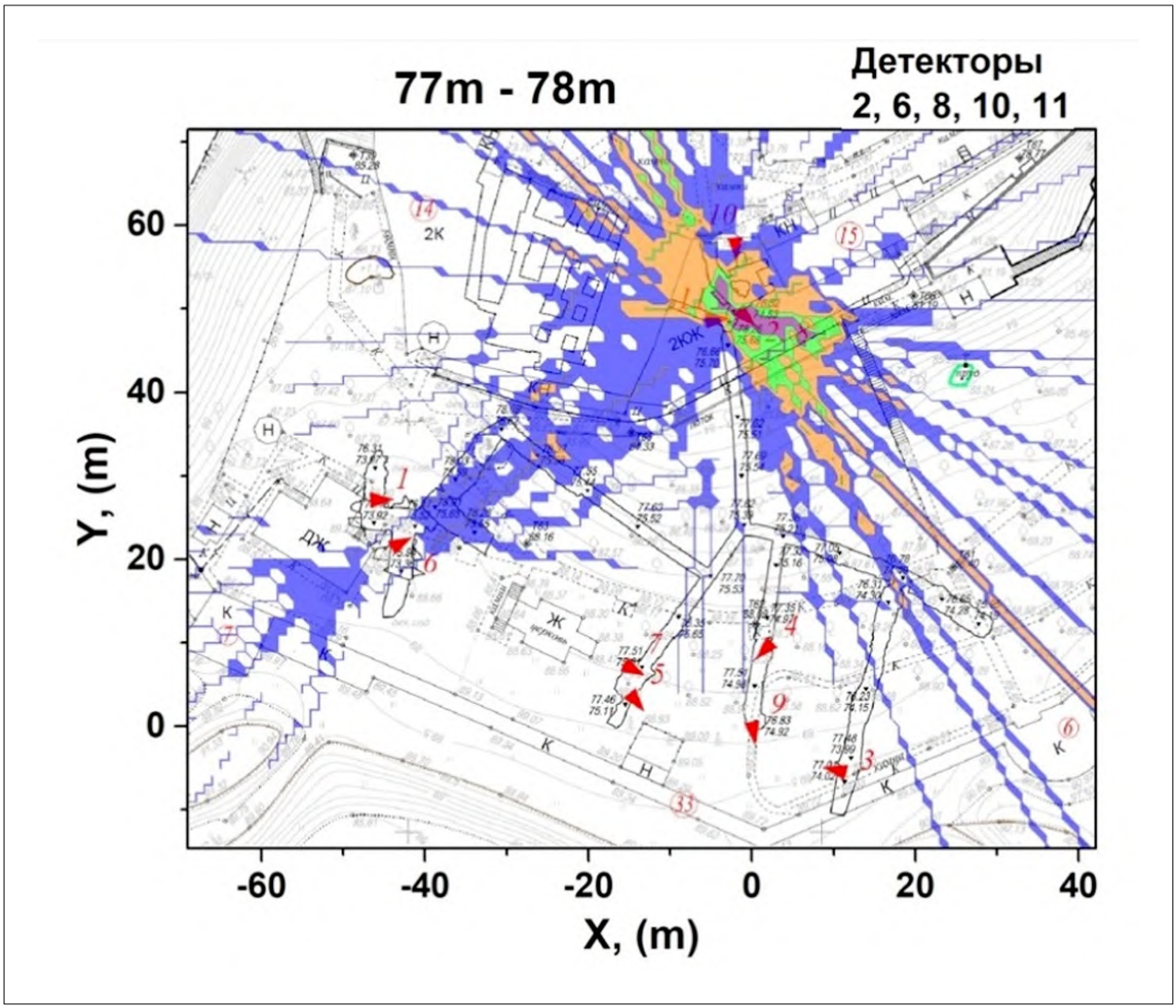


Рис. 6. Пересечение локальных максимумов потоков мюонов в детекторах № 2, 6, 8, 10 и 11 с плоскостью между высотами 77 и 78 м (отсчитывается от уровня Балтийского моря). Данные нанесены на общий план пещерного храма Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря (по Alexandrov et al. 2024)**. Красные треугольники соответствуют местам установки детекторов и указывают направление обзора. Локальные максимумы одного детектора отмечены синим цветом, пересечение двух детекторов — оранжевым, трёх — зеленым, четырёх — фиолетовым.**

Fig. 6. Intersection of local maxima in the muon fluxes recorded by detectors Nos. 2, 6, 8, 10, and 11 with a horizontal plane at elevations between 77 and 78 m above Baltic Sea level. The data are plotted on the general plan of the cave church of the Holy Dormition Pskovo-Pechersky Monastery (after Alexandrov et al. 2024)**. Red triangles indicate the detector locations and their viewing directions. Local maxima recorded by a single detector are shown in blue; intersections involving two detectors are shown in orange, three in green, and four in purple.**

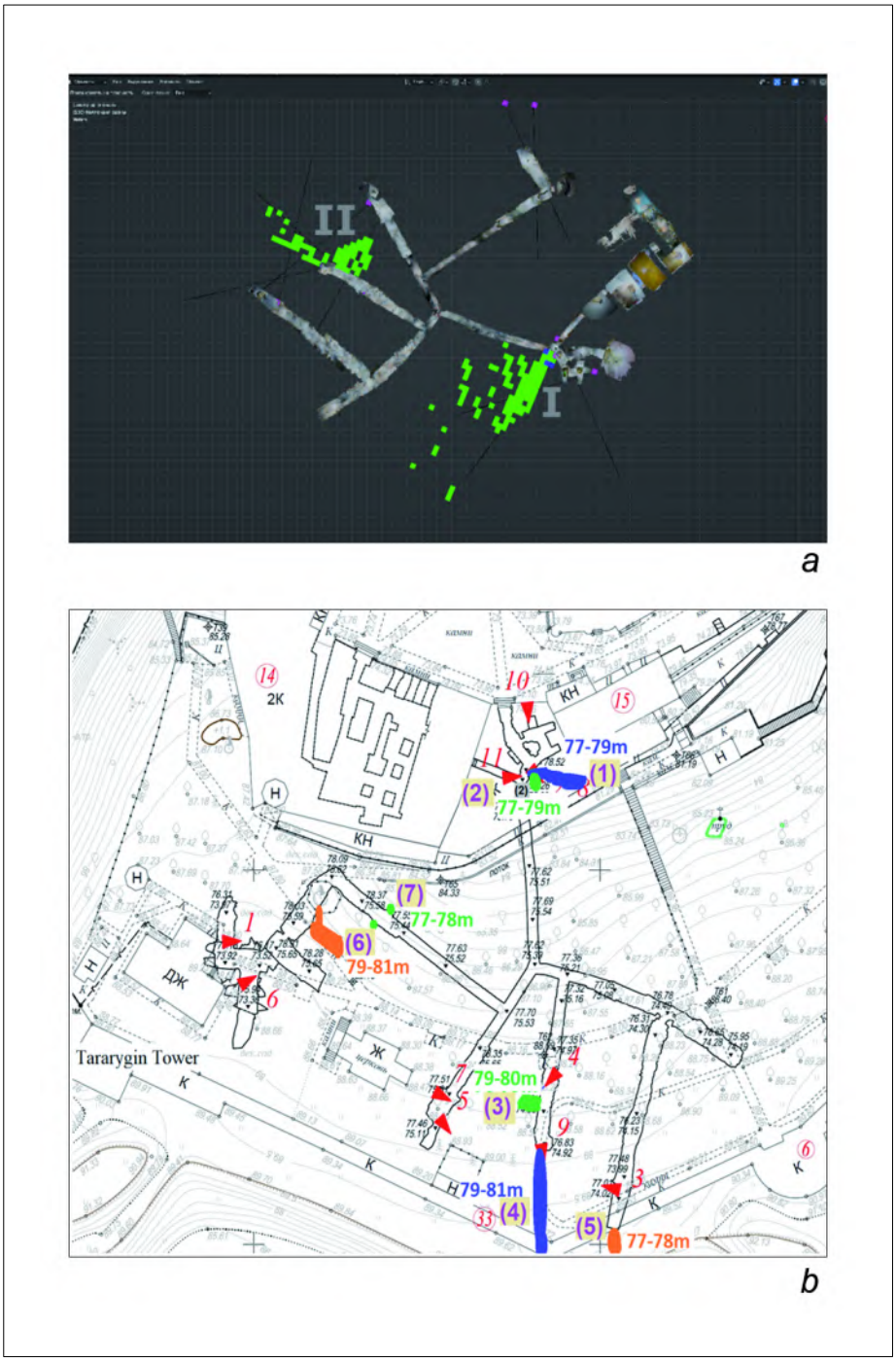


Рис. 7. Результаты мюонографического эксперимента в Свято-Успенском Псково-Печерском монастыре: *a* — зелёным цветом обозначены ранее неизвестные полости, обнаруженные при исследовании пещерного храма монастыря; *b* — карта обнаруженных неизвестных ранее пустот в пещерном храме с указанием высот, полученная с помощью авторского алгоритма поиска пересечения локальных экстремумов потоков мюонов, зарегистрированных эмульсионными детекторами.

Fig. 7. Results of the muography experiment at the Holy Dormition Pskovo-Pechersky Monastery: *a* — previously unknown cavities discovered during the investigation of the monastery's cave church, shown in green; *b* — map of previously unknown voids in the cave church, with elevation values indicated, generated using the authors' algorithm for identifying intersections of local extrema in muon fluxes recorded by nuclear emulsion detectors.

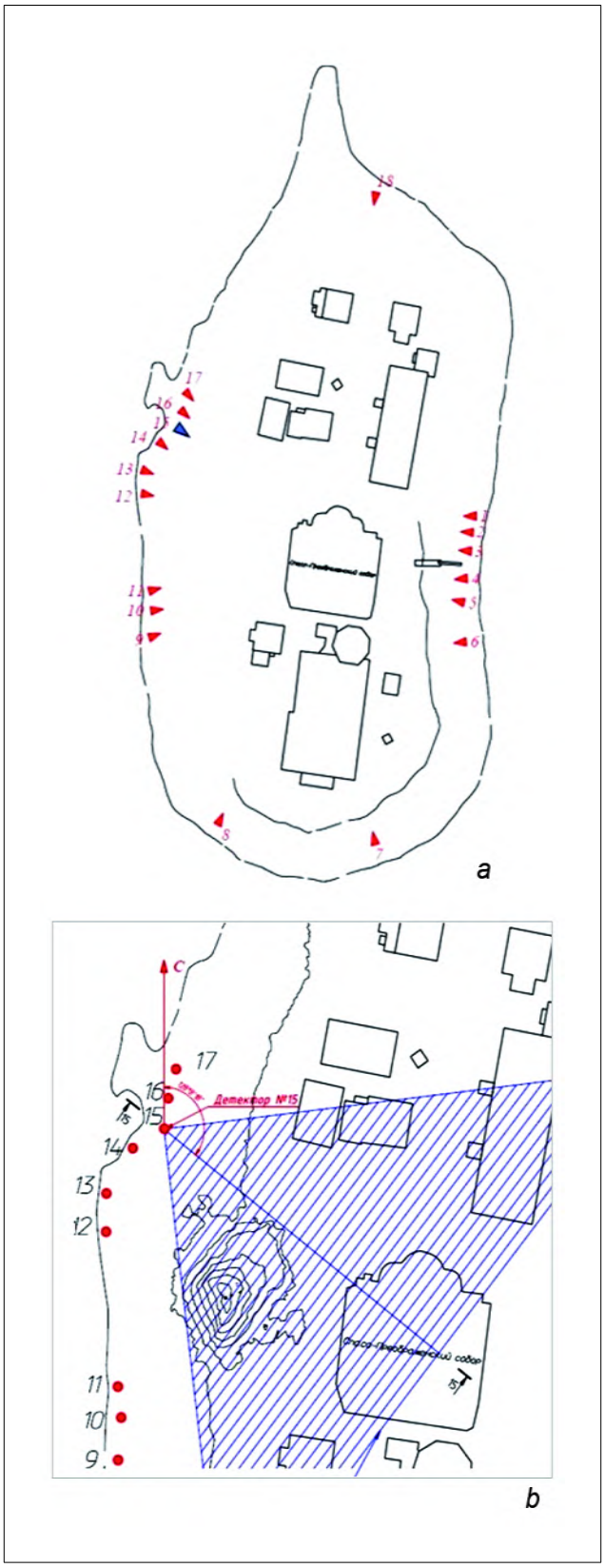


Рис. 8. Схема эксперимента на Каменном острове: *a* — расположение детекторов для мюонографии по периметру острова; *b* — дирекционный угол обзора одного из детекторов (№ 15).

Fig. 8. Experimental setup on Kamenny Island: *a* — locations of muography detectors around the perimeter of the island; *b* — viewing azimuth of one of the detectors (No. 15).



Рис. 9. Участок горы Бытха в Большом Сочи, где запланирован новый мюонографический эксперимент. Цифрами отмечены предполагаемые места установки детекторов на экспозицию.

Fig.9. Section of Mount Bytha in Greater Sochi where a new muography experiment is planned. Numbers indicate the proposed locations of detectors for data collection.

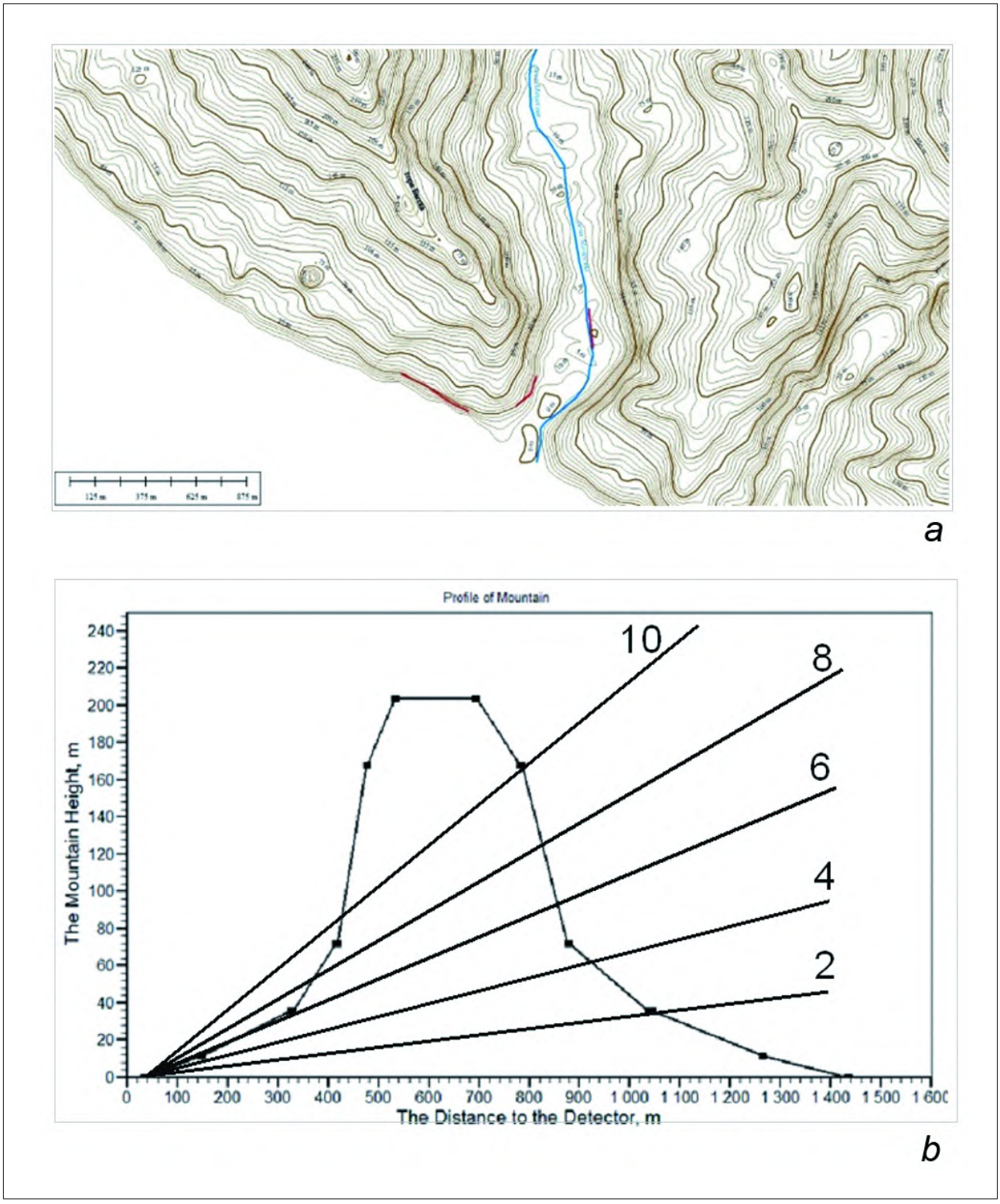


Рис. 10. Подготовка мюонографического эксперимента на горе Бытха: *a* — топографическая карта исследуемого участка горы Бытха с линиями уровня; *b* — профиль горы с траекториями мюонов, падающих на детектор; цифры соответствуют значениям угла к горизонту (в градусах).

Fig. 10. Preparation for the muography experiment on Mount Bytha: *a* — topographic map of the study area on Mount Bytha with contour lines; *b* — mountain profile showing the trajectories of muons incident on the detector; numbers indicate the angles relative to the horizontal (in degrees).