МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 53.06

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЮОНОГРАФИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ПАМЯТНИКА КАГАНСКО-КНЯЖЕСКОГО ТИПА

Н. С. Коновалова[1,2], Н. М. Окатьева[1], Ж. Т. Садыков[2,3], Е. Н. Старкова[1]

Представлены результаты моделирования ожидаемых угловых распределений потоков атмосферных мюонов в результате их поглощения в объекте с инородным включением для мюонографического исследования памятника периода ранних саков – погребально-поминального комплекса Каркара.

Ключевые слова: мюонография крупных объектов, особенности поглощения мюонных потоков, моделирование эксперимента.

Введение. Активно развивающийся метод мюонографии [1] использует мюонную компоненту вторичного космического излучения для изучения внутренней структуры крупных природных, промышленных или археологических объектов на поверхности земли. Метод мюонографии основан на “просвечивании” этих объектов высокоэнергичными мюонами космического происхождения и изучении особенностей поглощения мюонных потоков, проходящих через объект с разных направлений. В основе метода мюонографии лежат принципы, аналогичные принципам рентгенографии. Так, чем выше плотность материала вдоль какого-либо направления, тем интенсивнее происходит ослабление потоков мюонов в этом направлении в результате поглощения, связанного с потерей энергии частиц. В мюонографических экспериментах анализируются угловые распределения мюонов, зарегистрированных детекторами, расположенными ниже или сбоку от исследуемых областей и просматривающих верхнюю полусферу. Данные детекторов позволяют сопоставить плотности потоков мюонов с разных направлений, и таким образом восстановить пространственное положение и оценить размеры областей

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

[2] НИТУ “МИСиС”, 119049 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4.

[3] ТОО “Физико-технический институт”, 050032, Республика Казахстан, Алматы, ул. Ибрагимова, 11.

повышенной или пониженной плотности внутри объекта, скрытых от прямого наблюдения. На начальном этапе мюонографического эксперимента осуществляется моделирование угловых распределений потоков мюонов, прошедших через объект, и формируемого этими потоками отклика детекторов.

В статье описан алгоритм моделирования мюонографического эксперимента по изучению конической структуры, имитирующей крупный погребальный курган, включающей области повышенной и пониженной плотности. Погребально-поминальный комплекс Каркара расположен в 13 км к юго-востоку от одноименного села Кегенского района Алматинской области (рис. 1).



Рис. 1: *Погребально-поминальный комплекс Каркара (вид сверху).*

Моделирование мюонографического эксперимента. При моделировании мюонографического эксперимента отклики детекторов разыгрываются для случая монолитного объекта и сравниваются с полученными экспериментальными результатами (см, напр., [2–4]). Расхождение между модельным и экспериментальным результатами может указывать на аномалии плотности внутри объекта. Направления траекторий мюонов характеризуются углами θ и φ – угловой частью сферических координат с вертикальной осью, направленной перпендикулярно к поверхности земли. Угловые распределения зарегистрированных потоков описываются функцией зависимости количества мюонов от направления треков $F(\theta, \varphi)$, полученной в некотором телесном угле. Особенности экспериментальных распределений указывают на наличие областей с пониженной (локальные максимумы функции $F(\theta, \varphi)$) или повышенной (локальные минимумы

функции $F(\theta, \varphi)$) плотностью в направлении (θ, φ). Показания одного детектора указывают направление на предполагаемую особенность, однако не позволяют определить расстояние от точки регистрации до неё. Чтобы оценить положение особенности в пространстве, необходимо объединить показания нескольких детекторов, установленных вокруг объекта.

Такие расчёты требуют создания объёмной модели изучаемого объекта. Для зданий и промышленных сооружений используются технические чертежи, а для моделей объектов естественного происхождения (горы, холмы, пещеры и т. п.) могут быть использованы результаты измерений высот или глубин с последующим построением линий уровня. В данных расчётах использовалась модель холма с размерами в горизонтальной плоскости 550 м по оси X и 250 м по оси Y, представленная линиями уровня на рис. 2. Внутри холма расположена инородная сфера диаметром 25 м. На рис. 2 показаны траектории проникающих мюонов в виде пронумерованных лучей, сходящихся к детектору с разных направлений. В качестве материала холма использовался скальный грунт плотностью 2.65 г/см^3; для вещества инородной сферы были рассмотрены два варианта: железо (плотность 7.84 г/см^3) и грунт с пониженной плотностью 2.3 г/см^3.

Атмосферные мюоны, проходя через вещество, испытывают рассеяние и частичное поглощение, степень которых определяется плотностью материала, длиной пройденного в объекте пути и энергетическим спектром частиц. Необходимые для расчётов величины поглощения мюонов в различных материалах были взяты из работы [5], энергии мюонов получены методом моделирования в соответствии с экспериментальным энергетическим спектром [6] с учётом зависимости от зенитного угла θ как $\cos^2(\theta)$.

По величине потока, зарегистрированного детектором в определенном направлении, можно судить о степени поглощения мюонов, характере грунта и о возможных инородных включениях, скрытых в его толще. С помощью показаний детектора определяются величины потоков мюонов $F(\theta, \varphi)$, достигших уровня регистрации, и направление их прихода, т. е. проекции измеренных треков мюонов на верхнюю полусферу с центром в точке размещения детектора. Сравнивая распределения $F(\theta, \varphi)$ с ожидаемыми распределениями, рассчитанными в предположении однородности вещества внутри объекта, можно сделать заключение о наличии областей повышенной или пониженной плотности внутри холма в направлении (θ, φ).

На первом этапе моделирования проводилась генерация событий прохождения мюонов через холм с учётом их поглощения и вычислялся результирующий поток в точке детектирования. Процесс поглощения мюонов в веществе объекта был смоделирован

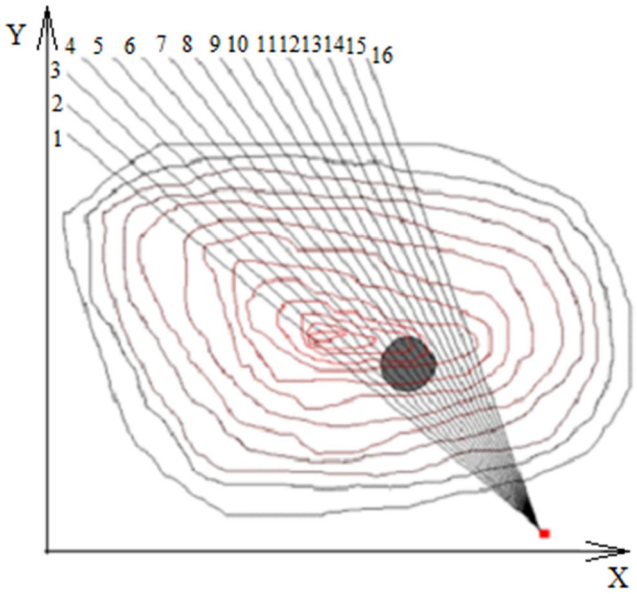


Рис. 2: *Линии уровня модели холма; шаг линий по высоте составляет* 20 *м. Наружная линия соответствует уровню земли, внутренняя – максимальной высоте холма* 220 *м. Цифрами пронумерованы траектории мюонов с разными значениями угла* φ*. Красный квадрат в правом нижнем углу указывает положение детектора. Тёмный круг представляет инородный объект в виде сферы внутри холма, который требуется обнаружить.*

с использованием алгоритма, описанного в [7]. Расчёты проводились для шестнадцати направлений по φ (рис. 2) и пяти направлений по θ в окрестности инородного включения (рис. 3). На рис. 3 показано вертикальное сечение холма с инородным включением в виде сферы. Прямые линии изображают траектории мюонов.

Для каждого направления (θ, φ) вычислялось расстояние $L(\theta, \varphi)$ между точками входа мюона в холм и выхода из него и величина остаточного потока $F(\theta, \varphi)$. В случае пересечения траектории мюона со сферой внутри холма поглощение вычислялось по алгоритму для слоистого объекта [7].

Для представления результатов была введена функция приведённого потока $F'(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi)/L(\theta, \varphi)$, позволяющая устранить зависимость результирующего протока в точке детектирования от длины пути мюонов внутри холма. Вид функции показан на рис. 4.

На фоне плавной поверхности на графике функции $F'(\theta, \varphi)$ при соответствующих углах чётко видно положение сферы. Более очевидное выделение инородного вклю-

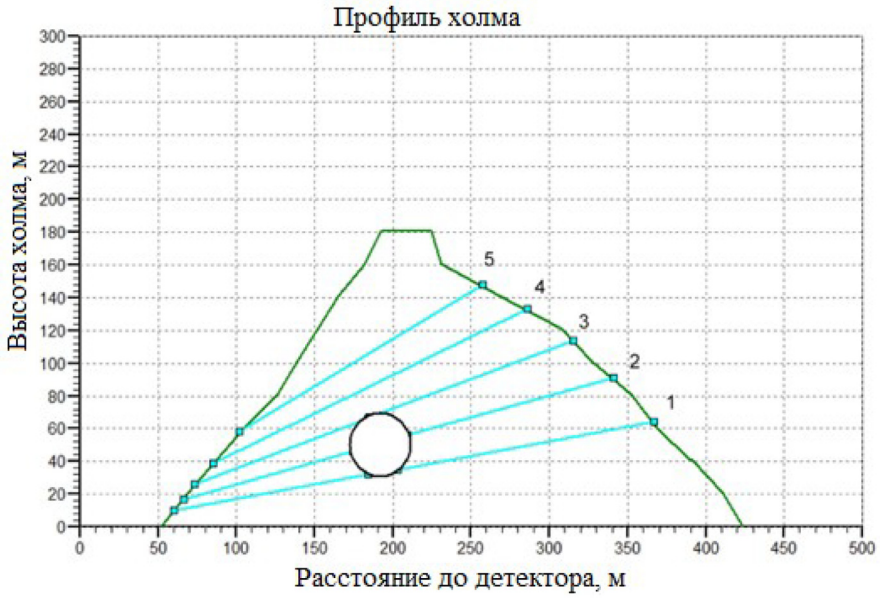


Рис. 3: *Вертикальное сечение холма, проходящее через линию* 4 *на рис.* 2. *Круг обозначает сечение сферы. Цифры соответствуют различным значениям угла* θ. *Детектор расположен в точке начала координат.*

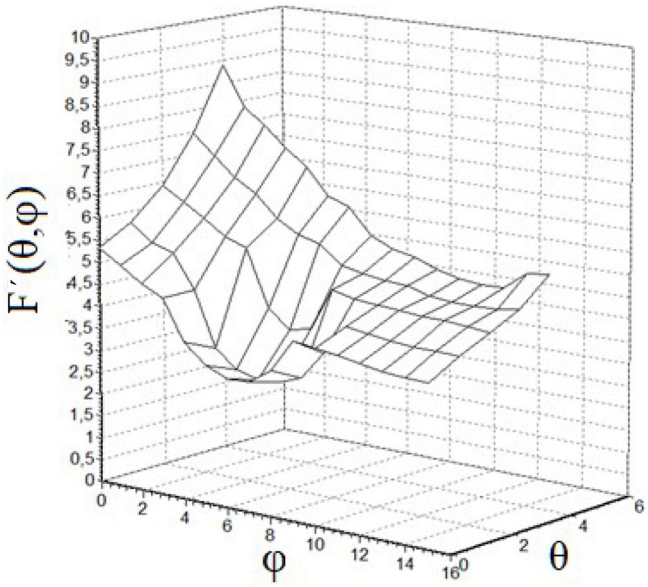


Рис. 4: *Вид функции приведённого потока* $F'(\theta, \varphi)$. *Значения углов* θ *и* φ *соответствуют направлениям на рис.* 2 *и* 3.

чения можно получить, если вместо длины пути мюона в объекте использовать так называемую "теоретическую" величину потока $F_{th}(\theta, \varphi)$, полученную в результате прохождения этой длины без учёта постороннего объекта. Результатом является функция $F''(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi)/F_{th}(\theta, \varphi)$, показанная на рис. 5(а) для случая железной сферы. Посторонний объект хорошо виден на фоне гладкой зависимости, полученной для соседних с ним областей. Вид функции $F''(\theta, \varphi)$, полученной для сферы из грунта меньшей плотности, чем основной материал холма (2.3 г/см^3), показан на рис. 5(б).

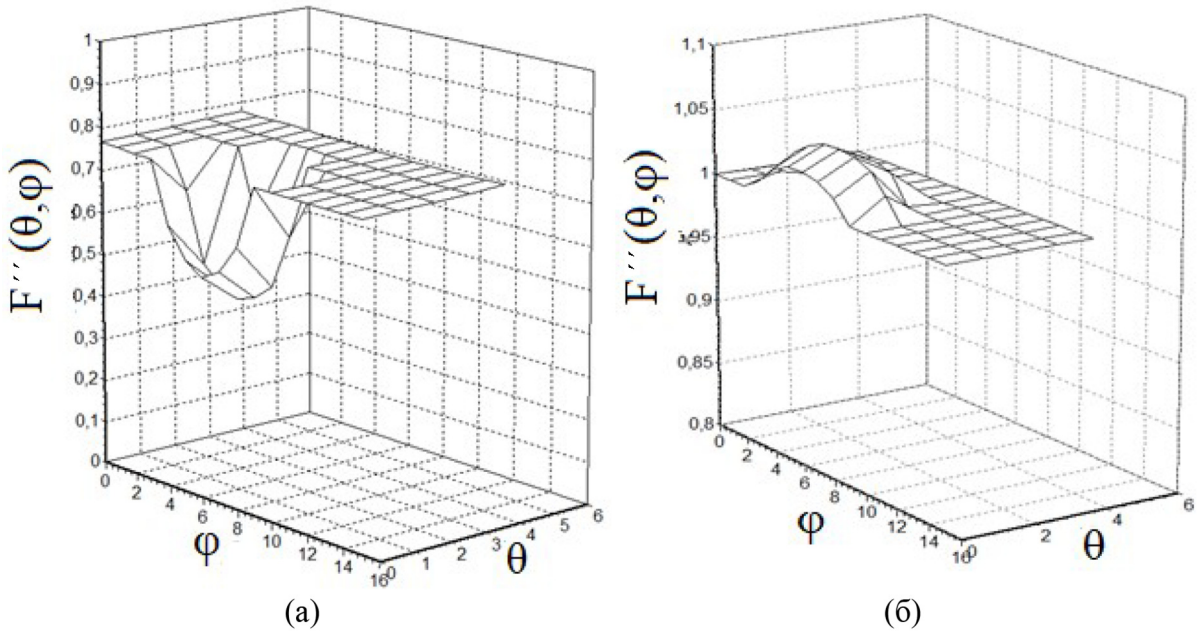


Рис. 5: *(а) вид функции $F''(\theta, \varphi)$ для случая железной сферы; (б) вид функции $F''(\theta, \varphi)$ для случая сферы из менее плотного грунта. Значения углов θ и φ соответствуют направлениям на рис.* 2 *и* 3.

Для определения положения инородного включения в теле объекта около него необходимо установить, по крайней мере, два детектора (рис. 6). Их показания сопоставляются в тех направлениях, где наблюдаются минимумы функции $F''(\theta, \varphi)$, если включение имеет большую плотность, или максимумы, если оно имеет меньшую плотность. Пересечение этих направлений будет соответствовать положению этой аномалии на плоскости (рис. 6) или в пространстве (рис. 7). На рисунках область пересечения максимумов функции $F''(\theta, \varphi)$ в двух детекторах указывает положение инородного включения с плотностью, превышающей плотность основного материала исследуемого объекта; соответствующая область обозначена на рисунках с помощью специальной штриховки.

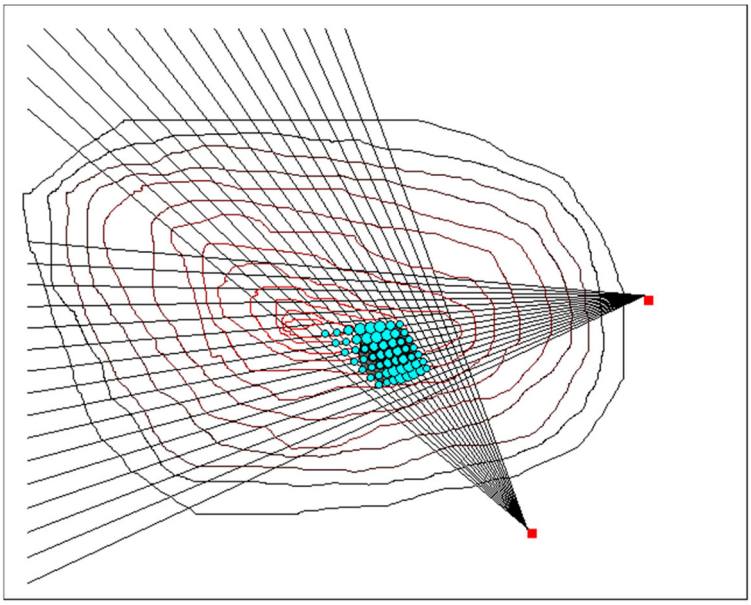


Рис. 6: *Локализация положения инородного включения в объёме изучаемого объекта. Специальной штриховкой обозначена область пересечения максимумов функции* $F''(\theta, \varphi)$*, наблюдаемых в двух детекторах.*

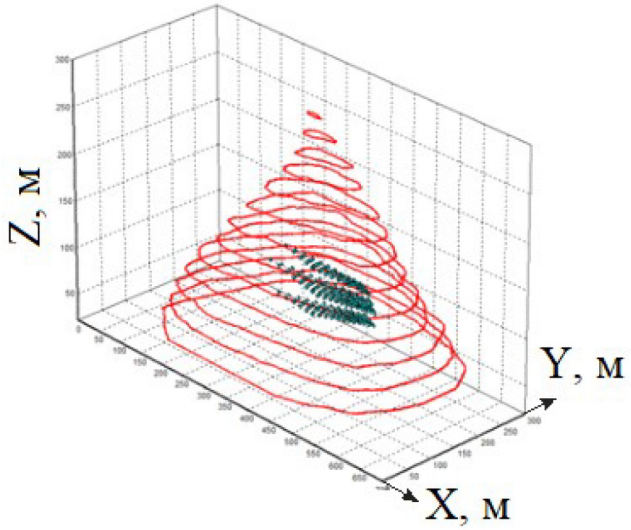


Рис. 7: 3*D представление области, занимаемой инородным включением в объёме исследуемого объекта. Специальной штриховкой обозначены пересечения траекторий мюонов, зарегистрированных двумя детекторами, в которых зарегистрированы максимумы функции* $F''(\theta, \varphi)$*.*

В качестве примера можно рассмотреть мюонографию низкого холма, схема которого показана на рис. 8. Детектор находится ниже уровня земли и ориентирован на предполагаемую полость, скрытую от прямого наблюдения. Задача модельного эксперимента – подтвердить или опровергнуть наличие внутри холма полости размером 1.5×0.8 м^2. Разность зарегистрированных потоков, соответствующих направлениям 1 и 2 на рис. 8, составляет $\sim$7–8%. Поскольку метод мюонографии позволяет зафиксировать разницу потоков, превышающую 5%, в приведённом примере полость может быть обнаружена с достаточной достоверностью.

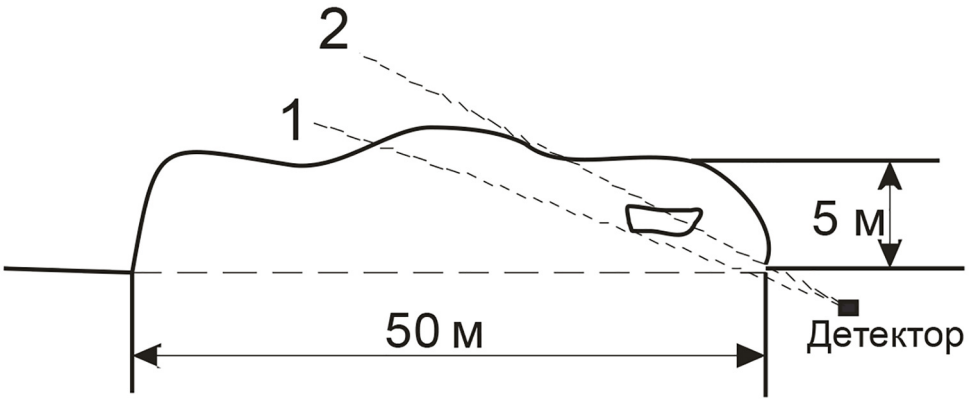


Рис. 8: *Профиль холма со скрытой полостью размером* 1.5×0.8 *м*^{2}*. Цифрами обозначены траектории мюонов, зарегистрированных детектором:* 1 *– мюон проходит мимо полости;* 2 *– мюон проходит через полость.*

Рис. 8 иллюстрирует предполагаемый объект исследования, погребально-поминальный комплекс Каркара, один из серии памятников каганско-княжеского типа, расположенных на территории Республики Казахстан. Памятник расположен в 13 км к юго-востоку от одноименного села Кегенского района Алматинской области. В ходе мюонографического исследования кургана предполагается выявить возможные неоднородности плотности в его толще.

Заключение. Представлен алгоритм моделирования мюонографического исследования холма с включением области повышенной или пониженной плотности. Полученный результат демонстрирует подход к анализу данных мюонографического эксперимента, основанный на сравнении полученных экспериментальных данных с результатами моделирования. Подход применим в случае, когда форма объекта и условия его расположения позволяют построить его 3D модель для расчёта отклика детектора, регистрирующего зондирующие мюоны. Однако, как показал опыт авторов по изучению методом

мюонографии сложных историко-архитектурных объектов, а именно подземных пещер Псково-Печерского монастыря [8] и руин собора Спасо-Каменного Преображенского монастыря на острове Каменном в Кубенском озере Вологодской области [9], такой подход не является единственным. Упомянутые архитектурные объекты представляли собой сложные наборы строений и их фрагментов, и в поле зрения детекторов находились многие близко расположенные здания и руины неправильной формы с множеством структурных особенностей. Поэтому при анализе данных этих экспериментов был применён метод анализа полученных экспериментальных данных, достоверность которых тестировалась на визуально проверяемых объектах.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP23489525).

Л И Т Е Р А Т У Р А

[1] H. K. M. Tanaka, A. Giammanco, C. Bozza, et al., Muography, Nat. Rev. Methods Primers **3**, 87 (2023). https://doi.org/10.1038/s43586-023-00270-7.

[2] А. Б. Александров, С. Г. Васина, В. И. Галкин и др., ЭЧАЯ **53**(6), 1423 (2022). DOI: 10.1134/S1063779622060028.

[3] G. Liu, K. Yao, F. Niu, et al., Geophys. J. Int. **237**, 588 (2024). DOI: 10.1093/gji/ggae057.

[4] S. Aly, Y. Assran, B. ElMahdy, et al., Journal of Advanced Instrumentation in Science, JAIS-470 (2024). DOI: 10.31526/JAIS.2024.470.

[5] D. E. Groom, N. V. Mokhov, S. I. Striganov, Atom. Data Nucl. Data Tabl. **78**, 183 (2001). https://doi.org/10.1006/adnd.2001.0861.

[6] J. Kremer, M. Boezio, M. L. Ambriola, et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 4241 (1999). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4241.

[7] С. Г. Земскова, Н. И. Старков, Краткие сообщения по физике ФИАН **42**(2), 11 (2015). DOI: 10.3103/S1068335615020025.

[8] A. Alexandrov, A. Anokhina, S. Vasina, et al., Phys. At. Nucl. **87**(6), 718 (2024). DOI: 10.1134/S1063778824700649.

[9] A. B. Alexandrov, P. A. Babaev, A. A. Gippius, et al., Physics of Atomic Nuclei **87**, S305 (2024). DOI: 10.1134/S1063778824700935.

Поступила в редакцию 27 марта 2025 г.
После доработки 15 мая 2025 г.
Принята к публикации 16 мая 2025 г.