## Анализ результатов в экспериментах по мюонной радиографии при поиске структур в грунте

В.И. Галкин,<sup>1, а</sup> А.К. Манагадзе<sup>2, б</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики космоса. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. <sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ).

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 29.04.2021, после доработки 11.06.2021, принята к публикации 14.06.2021.

В целях развития метода мюонной радиографии проведены модельные расчеты тестовых экспериментов по мюонной радиографии для нескольких конфигураций плотных структур в однородном грунте. Оценивается чувствительность метода и возможная роль статистических флуктуаций для рассмотренных случаев. Рассматривается количественный подход к анализу мюонных радиограмм, который может быть использован при планировании будущих экспериментов.

*Ключевые слова*: мюонная радиография, чувствительность детекторов, методика регистрации. УДК: 539.1.05. РАСS: 25.30.Мг.

#### введение

В последнее время метод мюонной радиографии (МР) постепенно начинает находить применение в различных исследовательских проектах. Основанный на анализе процессов поглощения и рассеяния потоков мюонов космического происхождения при прохождении через вещество изучаемого объекта метод мюонной радиографии может применяться при зондировании крупномасштабных промышленных, геологических, археологических и других объектов и материалов. Мюоны составляют основную компоненту космического излучения на уровне моря (по различным данным, от 63% [1] до 80% [2] всех наблюдаемых частиц). Они рождаются в результате распада заряженных *π*- и К-мезонов, образующихся в верхних слоях атмосферы при взаимодействии ядерноактивных частиц первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы Земли [3]. Даже при сравнительно умеренной энергии мюон может не только пройти сквозь всю земную атмосферу, но и проникнуть глубоко в грунт: мюоны космического происхождения ТэВ-ных энергий регистрируются в подземных лабораториях на глубинах более 2.5 км [4]. Регистрирующими устройствами могут служить электронные или эмульсионные трековые детекторы элементарных частиц.

В разных странах разрабатываются весьма разнообразные и разнородные проекты по исследованию методом МР геологических объектов Марса [5], ледниковых плит [6], археологических объектов [7], пожароопасных углепородных отвалов, промышленных объектов [8, 9], а также объектов ядерной энергетики [10]. Возможно также и применение МР при разведке полезных ископаемых [11]. Стоит отметить также проекты по мониторингу методом МР состояния активной зоны реактора атомной станции «Фукусима-1» в Японии, поврежденного цунами в 2011 году [12].

Принцип мюонной радиографии основан на двух физических эффектах: ослабление мюонного потока в поглотителе за счет электромагнитных процессов (при энергиях  $E_{\mu}$  > 100 ГэВ определяющий вклад вносит тормозное излучение [13]) и многократное кулоновское рассеяние, когда с ростом заряда ядра поглотителя степень рассеяния частиц возрастает, что приводит к большему отклонению угла траектории частицы от первоначального значения. В случае когда на пути потока частиц встречается вещество с другой плотностью, интенсивность электромагнитных взаимодействий изменяется, что приводит к изменению интенсивности поглощения потока мюонов в этой области. Используемый данным методом поток мюонов возникает в результате взаимодействия высокоэнергичных космических ядер с ядрами атмосферы, дающего начало ядерно-электромагнитному каскадному процессу — широкому атмосферному ливню. Поэтому мюоны приходят из верхней полусферы, и в экспериментах с мюонной радиографией детектор должен располагаться сбоку или ниже изучаемого объекта. Мюоны, имеющие пробег до остановки, превышающий длину пути в объекте, достигают детектора, и каждый зарегистрированный мюон характеризуется значениями азимутального и зенитного углов его траектории относительно оси, перпендикулярной плоскости детектора. Число мюонов, прошедших сквозь объект, зависит от материала исследуемого объекта и длины пути мюона в нем. По угловому распределению треков мюонов, зарегистрированных детектором, можно судить о наличии в данном направлении зон, различающихся по свойствам материала. Подробное описание метода и его возможностей дано, в частности, в обзоре [14].

В России в рамках освоения и развития метода мюонной радиографии было проведено несколько экспериментов, в частности были проведены эксперименты с просвечиванием части ускорителя

<sup>&</sup>lt;sup>*a*</sup> E-mail: v\_i\_galkin@mail.ru

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> E-mail: akmanag48@mail.ru

в НИИЯФ [15, 16] и испытательного стенда на шинном заводе [17, 18] как массивных исследуемых объектов, тестировалась также возможность установления пустых пространств в испытательной исследовательской шахте Геофизической службы РАН в г. Обнинске [19, 20], тестировались возможности изучения археологического объекта — подземного сооружения (возможно, древнейшего в России храма) в историческом заповеднике Нарын-кала в г. Дербенте в Дагестане [21, 22]. В настоящее время ведется работа с детекторами мюонной радиографии по заказу православной церкви в Свято-Даниловом монастыре в г. Переславле-Залесском.

При работе методом МР необходимо использовать расчеты по моделированию распределения мюонных потоков в исследуемых объектах. В настоящей работе представлены результаты по моделированию некоторых полезных частных случаев чувствительности детекторов мюонной радиографии к плотным объектам в грунте. Расчет этих простых конфигураций дает некоторое представление о возможности количественного анализа экспериментальных угловых распределений мюонов и может быть полезным при планировании будущих экспериментов.

#### 1. МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

# 1.1. Сравнение картин регистрации мюонов трековым детектором при наличии и отсутствии объектов с большой плотностью в однородной среде

Случай наличия воздушных пустот в грунте был нами рассмотрен ранее (см. работу авторов в этом журнале за 2020 г.). Сравнение проводилось через профили разрезов сигналов при наличии и отсутствии объектов. В этой статье мы рассмотрим отражения в сигнале детектора более плотных объектов в грунте через двумерный анализ сигналов.

Схема объекта моделирования представлена на рис. 1.

Под поверхностью Земли находится обычный грунт с плотностью 2.2 г/см<sup>3</sup>. На глубине 10 м в грунте находятся 3 горизонтальных детектора площадью 400 см<sup>2</sup> каждый. В грунте также есть куб со стороной 3 м из железной руды плотностью



Рис. 1. Схема объекта моделирования

5.2 г/см<sup>3</sup> или из известняка плотностью 2.8 г/см<sup>3</sup>. Центр куба расположен на 2.5 м ниже поверхности грунта. На рисунке указаны горизонтальные расстояния детекторов от вертикальной проекции центра куба на плоскость наблюдения. Модельные расчеты прохождения мюонов через вещество проводились с помощью широко известного пакета GEANT4, который разработан для моделирования прохождения элементарных частиц и ядер через сложные установки в экспериментах на ускорителях [23–26]. На описанный объект направлялся поток мюонов в согласии с энергетическим и угловым распределением, взятым из работы [27]:

$$\frac{dI(\theta, \varphi, p)}{dp} = \frac{18}{p\cos(\theta) + 145} (p + 2.7 \sec(\theta))^{-2.7} \frac{p+5}{p+5 \sec(\theta)}$$

Здесь  $\theta, \varphi$  — зенитный и азимутальный углы прихода мюона, p — его импульс в ГэВ/с.

В приводимых расчетах использовался порог по энергии 5 ГэВ (мюоны более низких энергий поглощаются при прохождении 10 м грунта). Каждая конфигурация «неоднородность-детектор» моделировалась отдельно. Площадь детектора S всегда бралась 20 см  $\times$  20 см = 400 см<sup>2</sup>. На входе в грунт мюоны направлялись и позиционировались таким образом, чтобы в отсутствие взаимодействия в грунте они попадали в случайно выбранные точки, равномерно распределенные по поверхности детектора. Число прослеженных мюонов в этих расчетах составляло  $N = 3\,000\,000$  на каждую конфигурацию. Поскольку телесный угол, из которого приходили мюоны, зависел от конфигурации, для каждой из них оценка времени экспозиции Т была своя. Время экспозиции получается из следующего равенства:

$$S \times T \times \int_{5\,\Gamma \ni \mathrm{B/c}}^{\infty} dp \int_{\varphi_{\mathrm{min}}}^{\varphi_{\mathrm{max}}} d\varphi \int_{\theta_{\mathrm{min}}}^{\theta_{\mathrm{max}}} \sin\theta d\theta \frac{dI(\theta,\varphi,p)}{dp} = N.$$

С учетом использованных пределов интегрирования получаем для конфигураций со сдвигом 0, 3 и 5 м следующие значения T: 52.3, 85.5, 99.1 суток. В мюонной радиографии картину «изображения» объекта исследования в лучах мюонов, падающих на детектор под зенитным углом  $\theta$  и азимутальным углом  $\varphi$ , часто принято отображать в переменных tx и ty:  $TX = tg \theta \cdot \cos \varphi$  и  $TY = tg \theta \cdot \sin \varphi$ .

На рис. 2, a и 2, b изображен отклик детектора в координатах — Y для случая, когда детектор расположен в точке вертикальной проекции центра куба из железной руды (см. рис. 1) в случае однородного грунта без структур (рис. 2,b) и в случае присутствия объекта (куба) из более тяжелого материала (рис. 2,a). На рис. 2,b приведен результат вычитания гистограммы 2,a из гистограммы 2,b, это и есть величина эффекта обнаружения плотной структуры в грунте. Величины такого эффекта зависят от плотности обнаруживаемого куба-объекта.

Если в работе [?] показан анализ отклика детектора через сравнение профилей разрезов гистограмм



Рис. 2. Отклик детектора в случае однородного грунта без структур (б) и в случае присутствия объекта (куба) из более тяжелого материала (а); в — результат вычитания гистограммы а из гистограммы б

сигналов при наличии и отсутствии объектов в плоскости максимального различия этих гистограмм (что весьма удобно), то в данном подходе изучается вся двумерная картина отклика детектора, так как следует учесть, что избрать подходящую плоскость разреза в реальном эксперименте будет возможно нечасто.

Далее будем анализировать такие двумерные распределения.

Чтобы оценить величину влияния образований из более плотного материала в однородной среде (грунте) на картину отклика в детекторе, было проведено 5 серий однотипных модельных расчетов для конфигурации, изображенной на рис. 1. 5 серий было проведено, чтобы увидеть роль возможных флуктуаций в получаемом отклике детектора. Серии отличались только последовательностями случайных чисел при розыгрыше событий. В каждой серии разыгрыва-

Таблица 1. Величина, характеризующая эффект обнаружения плотных объектов в однородном грунте, — разность числа мюонов  $\Delta N$  в детекторе между случаями сплошного грунта (без куба) и наличием куба из более плотного вещества со стороной 3 м в поле зрения детектора. Рассмотрены варианты сдвига детектора относительно вертикальной проекции центра куба на плоскость наблюдения (см. рис. 1)

Куб-известняк	Сдвиг О м	Сдвиг 3 м	Сдвиг 5 м
$\Delta N/N_0, \%$	-3.3	-2.6	-2.3
1 серия			
$\Delta N/N_0, \%$	-2.5	-3.1	-3.0
2 серия			
$\Delta N/N_0, \%$	-2.4	-3.0	-3.0
3 серия			
$\Delta N/N_0, \%$	-2.5	-3.0	-3.3
4 серия			
$\Delta N/N_0, \%$	-2.4	-3.0	-2.8
5 серия			
Среднее	$-2.6\pm0.3$	$-2.9\pm0.2$	$-2.9\pm0.3$
по 5 сериям и $\sigma$			
Куб-железная руда	Слвиг О м	Слеиг З м	Сленг 5 м
J FJA-	Одын о ш	Сдвиг о м	Сдвиг о м
$\Delta N/N_0, \%$	-9.0	-12.0	-9.6
$\Delta N/N_0, \%$ 1 серия	-9.0	-12.0	-9.6
$\Delta N/N_0, \%$ 1 серия $\Delta N/N_0, \%$	-9.0 -9.3	-12.0 -12.1	-9.6 -10.5
$\Delta N/N_0, \%$ 1 серия $\Delta N/N_0, \%$ 2 серия	-9.0 -9.3	-12.0 -12.1	-9.6 -10.5
$\Delta N/N_0, \%$ 1 серия $\Delta N/N_0, \%$ 2 серия $\Delta N/N_0, \%$	-9.0 -9.3	-12.0 -12.1 -12.0	-9.6 -10.5
$\Delta N/N_0, \%$ 1 серия $\Delta N/N_0, \%$ 2 серия $\Delta N/N_0, \%$ 3 серия	-9.0 -9.3 -9.3	-12.0 -12.1 -12.0	-9.6 -10.5 -10.5
$\Delta N/N_0, \%$ 1 серия $\Delta N/N_0, \%$ 2 серия $\Delta N/N_0, \%$ 3 серия $\Delta N/N_0, \%$	-9.0 -9.3 -9.3 -8.9	-12.0 -12.1 -12.0 -12.0	-9.6 -10.5 -10.6
$\Delta N/N_0, \%$ 1 серия $\Delta N/N_0, \%$ 2 серия $\Delta N/N_0, \%$ 3 серия $\Delta N/N_0, \%$ 4 серия	-9.0 -9.3 -9.3 -8.9	-12.0 -12.1 -12.0 -12.0	-9.6 -10.5 -10.5 -10.6
$\Delta N/N_0, \%$ 1 серия $\Delta N/N_0, \%$ 2 серия $\Delta N/N_0, \%$ 3 серия $\Delta N/N_0, \%$ 4 серия $\Delta N/N_0, \%$	-9.0 -9.3 -9.3 -8.9 -9.1	-12.0 -12.1 -12.0 -12.0 -12.1	-9.6 -10.5 -10.6 -10.3
$\Delta N/N_0, \%$ 1 серия $\Delta N/N_0, \%$ 2 серия $\Delta N/N_0, \%$ 3 серия $\Delta N/N_0, \%$ 4 серия $\Delta N/N_0, \%$ 5 серия	-9.0 -9.3 -9.3 -8.9 -9.1	-12.0 -12.1 -12.0 -12.0 -12.0 -12.1	-9.6 -10.5 -10.5 -10.6 -10.3
$\Delta N/N_0, \%$ 1 серия $\Delta N/N_0, \%$ 2 серия $\Delta N/N_0, \%$ 3 серия $\Delta N/N_0, \%$ 4 серия $\Delta N/N_0, \%$ 5 серия Среднее	$ \begin{array}{c} -9.0 \\ -9.3 \\ -9.3 \\ -9.1 \\ -9.1 \pm 0.2 \end{array} $	$-12.0$ $-12.1$ $-12.0$ $-12.0$ $-12.1$ $-12.0 \pm 0.1$	$ \begin{array}{c} -9.6 \\ -10.5 \\ -10.5 \\ -10.6 \\ -10.3 \\ -10.3 \pm 0.4 \end{array} $

лись 2 варианта материала наблюдаемого объектакуба (железная руда и известняк) и 3 варианта расположения детектора (см. рис. 1) относительно вертикальной проекции центра куба на плоскость наблюдения. Результаты моделирования, подобного отображенному на рис. 2, представлены в табл. 1. Величины, характеризующие эффект присутствия плотных объектов для всех 5 серий, как видно из табл. 1, близки для выбранного варианта материала куба. Полученные средние значения эффекта показывают небольшие статистические погрешности. Эти оценки дают возможность предполагать такое же небольшое влияние флуктуаций на выявляемые с помощью мюонной радиографии эффекты от структур в грунте при достаточной экспозиции. При этом заметна большая разница в возможности наблюдения структур разной плотности в методе МР.

При анализе экспериментальных карт возникает желание опереться на аналогичные расчетные карты, полученные для различных конфигураций изучаемого/искомого объекта и в различных предположениях о составе и свойствах окружающей среды. Поскольку таких комбинаций возможно великое множество, практическая ценность такого подхода вызывает сомнение. Расчеты конкретных конфигураций «среда– объект» в отсутствие конкретных данных о них,



Рис. 3. a — Схема численного эксперимента, включающая шесть однородных сферических объектов из известняка или железной руды. Центры шаров отстоят от горизонтального детектора на 9 м; б — карта угловых распределений зарегистрированных мюонов для случая шаров железной руды в координатах  $\theta - \varphi$ ; s — разностная диаграмма, полученная вычитанием каждого азимутального слоя исходной гистограммы из фоновой плотности; c — величина эффекта Q для разных объектов в зависимости от избыточной массы объекта для разных определений порога, выраженного в долях значения максимальной ячейки соответствующего горба карты на рис. 3, s, d и e — результаты, аналогичные данным на рис. 3, s, d и 3, e, но для объектов-шаров из известняка

по-видимому, могут быть использованы только для общей ориентации в распределениях потоков мюонов. Проведенные нами модельные парные расчеты с объектом и без него (смотрите [?], рис. 2 и табл. 1 настоящей работы) дают некоторое представление о величине эффекта и его вариациях, что может быть полезно и при планировании проведения экспериментов по мюонной радиографии, но сами по себе не представляют основного метода анализа карт потоков мюонов, получаемых в эксперименте. Такой метод во многих случаях должен работать только на основе экспериментальных данных и учитывать общие закономерности, связывающие свойства среды и объекта исследования с эффектом — угловым распределением зарегистрированных мюонов. Оставшаяся часть статьи посвящена получению этих общих закономерностей на основании расчетов и формулировке наших предложений по процедуре анализа экспериментальных карт.

### 1.2. Зависимость эффекта от избыточной массы объекта

Рассмотрим зависимость эффекта (уменьшения плотности потока зарегистрированных мюонов) от разности массы объекта и массы вытесненной им массы среды, такую величину для краткости будем называть избыточной массой объекта. Среду будем считать однородной всюду в поле зрения детектора. Схема численного эксперимента приведена на рис. 3,*а*. В грунте плотностью 2.2 г/см<sup>3</sup> располагались шесть однородных сферических объектов из известняка (плотностью 2.8 г/см<sup>3</sup>) или железной руды (плотностью 5.2 г/см<sup>3</sup>). Горизонтально ориентированный детектор площадью 400 см<sup>2</sup> был расположен под слоем грунта толщиной 10 м. Центры шаров отстоят от него на 9 м и видны ему под одинаковыми зенитными углами. Радиусы шаров составляли 0.75, 0.975, 1.2, 1.5, 1.8, 2.25 м. На конфигурацию с шарами из железной руды было брошено 6 000 000 мюонов с энергиями выше 5 ГэВ (время экспозиции примерно 39 суток), в случае с шарами из известняка для получения внятного эффекта потребовалось в 5 раз больше первичных мюонов.

Процедуру оценки эффекта проще демонстрировать на случае сфер из железной руды. Соответствующая карта угловых распределений зарегистрированных мюонов показана на рис. Зб в координатах  $\theta - \varphi$  (зенитный и азимутальный углы). Следы сферических объектов выглядят в этом представлении как впадины типа оврагов, разделенные стенками, по высоте сравнимыми с фоновым рельефом. Это дает возможность оценить фоновую плотность мюонов  $ho_{\mu}( heta)$  (скажем, в мюонах на бин), то есть плотность в отсутствие каких-либо неоднородностей среды. Мы делаем это усреднением по шести слоям (по одному максимальному слою из каждой стенки, которыми разделены впадины на рис. 3,б), каждый толщиной в одну ячейку гистограммы по  $\varphi$ . Необходимая для расчета эффекта разностная гистограмма представлена на рис. 3, в. Она получена вычитанием каждого азимутального слоя исходной гистограммы из фоновой плотности  $\rho_{\mu}(\theta)$ . Случайный характер распространения и регистрации мюонов приводит к появлению небольших отрицательных и положительных значений по всему полю разностной гистограммы.

Для уверенного разделения эффектов от разных объектов необходимо ввести некоторый положительный порог по содержимому бина: эффект вычисляется как сумма бинов с содержимым, большим или равным порогу. Выбор порога предполагает сравнение эффектов, полученных на разных объектах. Рис. 3, г демонстрирует зависимости эффекта в зависимости от избыточной массы объекта для разных определений порога. Порог берется в долях значения максимальной ячейки соответствующего горба карты на рис. 3, в. Самую простую зависимость от избыточной массы дает порог 0.5: в этом случае эффект уже свободен от флуктуаций многочисленных ячеек с малыми значениями, но еще включает много ячеек с большими значениями, поэтому демонстрирует минимальные вариации. Меньшие пороги (0.1 и 0.3) суммируют большое количество ячеек с малыми значениями, а порог 0.7 приводит к суммированию лишь небольшого числа ячеек с большим содержанием. Таким образом, порог 0.5 кажется оптимальным и приводит к почти линейной зависимости эффекта от избыточной массы: нарисованная сплошной прямой аппроксимация зависимости  $Q_{0.5}(M)$  вида

$$Q(M) = p\mathbf{0} \cdot M^{p1} \tag{1}$$

соответствует оптимальным параметрам, приведенным в рамочке. Здесь и далее Q есть сумма по всем бинам разностной гистограммы, имеющим содержимое выше порога. Приведенные на рис. 3, a зависимости соответствуют сферам из железной руды. В случае сфер из известняка, имеющего в пять раз меньшую избыточную плотность, даже при в пять раз большей экспозиции разностная гистограмма рис. 3, d оказывается значительно более расплывчатой, чем рис. 3, e, но зависимость эффекта от массы при пороге 0.5 имеет почти тот же наклон (рис. 3, e), то есть почти такой же показатель степени аппроксимации 1, что и соответствующая зависимость на рис. 3,e.

#### 1.3. Зависимость эффекта от расстояния до объекта

Сравним теперь зависимости эффекта от расстояния R от детектора до объекта для сфер радиуса 1.5 м из известняка и железной руды. В данном расчете центры сфер отстояли от детектора на 3, 6, 9 и 12 м, причем центры сфер были видны детектору под углом 48.2° к вертикали (то есть к нормали к плоскости детектора). Количество мюонов, брошенных на конфигурацию из четырех сфер из железной руды, составляло 8000000, а в случае сфер из известняка — в 5 раз больше. Эффект уменьшения плотности потока зарегистрированных мюонов с направлений на сферы обрабатывался так же, как и в предыдущем расчете, путем вычитания плотностей потоков в присутствии сфер из «фоновых» плотностей, оцененных по промежуткам между впадинами. Соответствующие карты разностей плотностей показаны на рис. 4,а и 4,в, а полученные зависимости эффекта от расстояния R приведены на рис. 4,6 и 4,г для сфер из железной руды и известняка, соответственно. Здесь зависимости эффекта Q от R аппроксимировались функцией вида

$$Q(R) = p\mathbf{0} \cdot R^{p_1}.$$
 (2)

Здесь, как и в случае зависимости Q от избыточной массы, порог 0.5 от максимальной плотности приводит к зависимостям, показатель степени которых почти не чувствует плотность исследуемых объектов.

#### 2. ВЫВОДЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОСТАНОВКИ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МР

Изложенные выше особенности угловых распределений атмосферных мюонов после прохождения ими исследуемой среды позволяют сделать некоторые выводы для экспериментов.

1. Для характерных размеров трековых детекторов площадью порядка нескольких сотен квадратных сантиметров для количественной оценки эффекта, вызванного неоднородностью среды, требуются времена экспозиции от месяца и более. Требуемое время экспозиции зависит также от размеров, плотности и удаленности неоднородностей от детектора.

2. В условиях отсутствия каких-либо данных о неоднородностях в поле зрения детектора эксперимент имеет смысл ставить таким образом, чтобы исследуемая область пространства просматривалась



Рис. 4. Зависимость эффекта разностных диаграмм от расстояния *R* между детектором и объектом для сфер радиуса 1.5 м из известняка и железной руды. Здесь центры сфер отстояли от детектора на 3, 6, 9 и 12 м. Карты разностей плотностей показаны на рис. 4,*a* (для объектов из железной руды) и 4,*b* (для объектов из известняка), а полученные зависимости эффекта *Q* от расстояния *R* приведены на рис. 4,*b* и 4,*c* для сфер из железной руды и известняка соответственно

несколькими детекторами с различных точек зрения. Сопоставление карт угловых распределений мюонов в разных детекторов может помочь определить положение неоднородностей, а затем и оценить их массу с помощью зависимости (1) эффекта от избыточной массы и зависимости (2) эффекта от расстояния в предположении относительно плотности неоднородности. Если положение объекта известно, можно обойтись одним детектором.

3. Зависимости (1) и (2) получены для вполне реальных плотностей (2.8, 5.2 г/см<sup>3</sup>), размеров (2– 3 м в диаметре) и расстояний (3–12 м) от неоднородностей до детектора. Способ их получения учитывает описанные в разд. 1.1 характерные величины эффекта и его флуктуации и опирается только на мюонные карты при наличии неоднородностей в среде. Обработка таких карт предполагает предварительное нахождение участков, не подверженных влиянию неоднородностей, и оценку по ним фоновой плотности мюонов. Анизотропия потока атмосферных мюонов, потери мюонов в среде и выбор конкретной системы координат могут повлиять на эту оценку, но она всегда возможна, хотя бы локально. Карта эффекта вычисляется вычитанием из оцененной карты фона карты «эффект+фон». Далее встает проблема выделения на разностной карте отдельных объектов (см. рис.  $3, \partial$  и 4в). После идентификации объектов для расчета эффекта, как показывает наше моделирование, удобно использовать порог на уровне 0.5 от содержимого максимальной для данного объекта ячейки. По вычисленному таким образом эффекту проще оценивать параметры неоднородности.

4. Размеры ячеек двумерной гистограммы углового распределения мюонов по каждой переменной должны быть в несколько раз меньше угловых размеров исследуемых неоднородностей.

57

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Allkofer O. C., Grieder P. K.F.* // Cosmic Rays on Earth. Physics Data. (Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, Karlsruhe, Germany). 1984.
- Berlinger J. et al. (Particle Data Group) // Phys. Rev.D. 2012. 86. P. 010001.
- Bugaev E. V., Misaki A., Naumov V.A. et al. // Phys. Rev. D. 1998. 58. P. 054001.
- Aglietta M., Alyea E.D., Antonioli P. et al. (LVD Collaboration) // Phys. Atom. Nucl. 2003. 66. P. 123.
- Kedar S., Tanaka H. K. M., Naudet C. J. et al. // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2013. 2. P. 157.
- Nishiyaa R., Ariga A., Ariga T. et al. // Geophys. Res. Lett. 2017. 44, N 12, P. 6244.
- Morishima K., Kuno M., Nishio A. et al. // Nature. 2017. 552. P. 386.
- Tanaka H. K. M. // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2013. 2. P. 79.
- Jourde K., Gibert D., Marteau J. et al. // Sci. Rep. 2016.
   P. 23054.
- Durham J. M., Guardincerri E., Morris C. L. et al. // AIP Advances. 2015. 5. P. 067111.
- Bryman D., Bueno J., Jansen J. // EPJ Web Conf. 2016.
   125. P.02022.
- Fukuda T., Fukunaga S., Ishida H. et al. // J. Instrum. 2013. 8. P. 01023.
- Groom D. E., Mokhov N. V., Striganov S.I. // At. Data Nucl. Data Tables. 2001. 78. P. 183.
- 14. Александров А.Б., Владимиров М.С., Галкин В.И. и др. // УФН. 2017. 187, № 12. С. 1375. (Aleksandrov A. B., Vladymyrov M. S., Galkin V. I. et al. // Phys. Usp. 2017. 60, N 12. P. 1.)
- 15. Деденко Л.Г., Манагадзе А.К., Роганова Т.М. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2014. № 8. С. 34. (Dedenko L.G., Managadze A.K.,

*Roganova T. M.* et al. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2014. **41**. P. 235.)

- 16. Aleksandrov A. B., Bagulya A. V., Chernyavsky M. M. et al. // Physics procedia. 2015. **80**. P. 78.
- 17. Александров А. Б., Галкин В. И., Деденко Л. Г. и др. // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2015. **12**. № 5 (196). С. 1100. (*Aleksandrov A. B., Bagulya A. V., Chernyavsky M. M.* et al. // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2015. **12**, N 5, P. 713.
- Aleksandrov A., Bagulya A., Baklagin S. et al. // EPJ Web of Conferences. 2016. 125. P. 02022.
- Baklagin S. A., Grachev V. M., Konovalova N. S. et al. // Intern. Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2016. 5, N 7. P. 12229.
- 20. Александров А.Б., Баклагин С.А., Галкин В.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. **81**, № 4. С. 541. (*Aleksandrov A. B., Baklagin S. A., Galkin V. I.* et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017. **81**, N 4. P. 500.)
- 21. Abiev A., Bagulya A., Chernyavskiy M. et al. // APPLIED SCIENCES-BASEL. 2019. 9, N 10. P. 2040.
- Abiev A., Bagulya A., Chernyavskiy M. et al. // Physics of Atomic Nuclei, 2019. 82, N 6. P. 804.
- 23. Geant4 Collaboration // Geant4 User's Guide for Application Developers. https://geant4.web.cern.ch/
- Agostinelli S. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2003. 506. P. 250.
- 25. Allison J., Amakoc K., Apostolakis J. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2016. 835. P. 186.
- Clarkson A., Hamilton D.J., Hoek M. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2014. 746. P. 64.
- Bogdanova L. N., Gavrilov M. G., Kornoukhov V. N., Starostin A. S. // Physics of Atomic Nuclei. 2006. 69. P. 1293.

#### Analysis of the Results of Muon Radiography Experiments in the Search for Structures in the Ground

#### V.I. Galkin<sup>1,a</sup>, A.K. Managadze<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia <sup>2</sup>D.V.Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow 119191, Russia E-mail: <sup>a</sup>v\_i\_galkin@mail.ru, <sup>b</sup>akmanag48@mail.ru

In order to develop the muon radiography method, model calculations of test experiments on muon radiography for several configurations of dense structures in a homogeneous ground were carried out. The sensitivity of the method and the possible role of statistical fluctuations for the considered cases have been estimated. A quantitative approach to the analysis of muon radiograms is considered, which can be used when planning future experiments.

*Keywords*: muon radiography, sensitivity of detectors, registration technique. PACS: 25.30.Mr.

Received Received 29 April 2021.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2021. 76, No. 5. Pp. 305-312.

#### Сведения об авторах

- 1. Галкин Владимир Игоревич доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: v\_i\_galkin@mail.ru.
- 2. Манагадзе Александр Константинович доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-37, e-mail: akmanag48@mail.ru.