

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Оценка чувствительности детекторов мюонной радиографии к пустотам в грунте

В. И. Галкин,^{1, а} А. К. Манагадзе^{2, б}*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,**¹ физический факультет, кафедра физики космоса;**² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ).
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

Поступила в редакцию 31.05.2020, после доработки 18.06.2020, принята к публикации 18.06.2020.

Приводятся результаты модельных расчетов тестовых экспериментов по мюонной радиографии для нескольких конфигураций пустот в грунте и различных положений детекторов мюонов. Оценивается чувствительность метода для рассмотренных случаев. Работа закладывает основы количественного анализа данных в мюонной радиографии и может быть использована для планирования будущих экспериментов.

Ключевые слова: мюонная радиография, чувствительность детекторов, методика регистрации.

УДК: 539.1.05. PACS: 25.30.Mg

ВВЕДЕНИЕ

Мюонная радиография — это метод зондирования крупномасштабных промышленных, геологических, археологических и других объектов и материалов, в основе которого лежит анализ процессов поглощения и рассеяния потоков мюонов космического происхождения при прохождении через вещество изучаемого объекта. 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 K -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 энергий регистрируются в подземных лабораториях на глубинах более 2.5 км [4]. Регистрирующими устройствами могут служить электронные или эмульсионные трековые детекторы элементарных частиц.

В настоящее время в разных странах разрабатываются новые проекты по исследованию методом МР ледниковых плит [5], геологических объектов Марса [6], археологических объектов [7], пожароопасных углепородных отвалов, промышленных объектов [8, 9], объектов ядерной энергетики [10] и новых методов разведки полезных ископаемых [11]. Отдельно необходимо отметить проекты по мониторингу методом МР состояния активной зоны реактора атомной станции Фукусима-1 в Японии, поврежденного цунами в 2011 г. [12].

Физический принцип мюонной радиографии основан на двух 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 метод мюонной радиографии стал развиваться в последние годы. Было проведено несколько экспериментов, в частности в шахте Геофизической службы РАН в г. Обнинске [15, 16] и на археологическом объекте в исторической крепости Нарын-Кала в г. Дербенте [17, 18]. Опыт показывает, что при работе этим методом совершенно 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 пустотам в грунте. Расчет этих простых конфигураций дает некоторое представление о возможности количественного анализа экспериментальных угловых распределений мюонов и может служить опорой для планирования будущих экспериментов.

^а E-mail: v_i_galkin@mail.ru

^б E-mail: akmanag48@mail.ru

1. МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Для проведения такого расчетного теста была выбрана следующая схема объекта моделирования (рис. 1). Под горизонтальной поверхностью Земли находится обычный грунт с плотностью 2.5 г/см³. На глубине 10 м в грунте расположены 4 горизонтальных детектора площадью 400 см² каждый. В грунте также находится полая воздушная сфера с радиусом R (два варианта: $R = 150$ см и $R = 75$ см). В обоих случаях центр сферы расположен на 2 м ниже поверхности грунта. На рисунке указаны горизонтальные расстояния детекторов от вертикальной проекции центра сферической полости на плоскость наблюдения.

Далее модельные расчеты прохождения мюонов через вещество проводятся с помощью широко известного пакета GEANT4, который разработан для моделирования прохождения элементарных частиц и ядер через сложные установки в экспериментах на ускорителях [19–22]. На описанный объект направлялся поток мюонов в согласии с энергетическим и угловым распределением, взятым из работы [23]:

$$\frac{dI(\theta, \varphi, p)}{dp} = \frac{18}{p \cos(\theta) + 145} \times (p + 2.7 \sec(\theta))^{-2.7} \frac{p + 5}{p + 5 \sec(\theta)}. \quad (1)$$

Здесь импульс мюона p измеряется в ГэВ/с, $1 \leq p \leq 10^5$ ГэВ/с. Структура формулы (1) подобна представленной в [24], но выбор параметров лучше описывает экспериментальный спектр вертикального потока мюонов при $p < 10^3$ ГэВ/с и спектры в диапазоне зенитных углов $0^\circ - 85^\circ$ [25]. Аппроксимация формулы (1) не противоречит результатам теоретических вычислений вертикального потока мюонов [3, 26, 27]. В отличие от медицинской томографии [28], использующей источник излучения с известными характеристиками, предлагаемая методика использует излучение, имеющее разброс по энергиям и углам падения, что требует информации об угловом распределении зондирующего излучения.

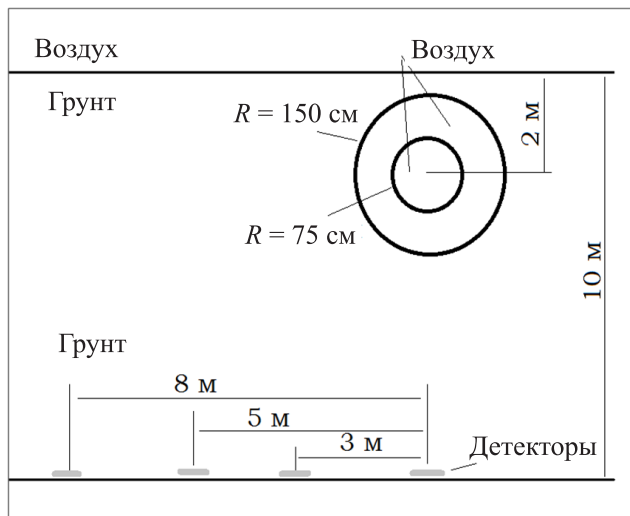


Рис. 1. Схема объекта моделирования

В приводимых расчетах использовался порог по энергии 5 ГэВ (мюоны более низких энергий поглощаются при прохождении 10 м грунта). При моделировании была взята статистика 10 000 000 частиц, при этом число мюонов, зарегистрированных детектором площадью 400 см², составляло около 1 754 000, что примерно соответствует экспозиции детекторов в течение 51 дня. Оценка интенсивности мюонов I_μ с энергиями выше 5 ГэВ в диапазоне зенитных углов $0^\circ - 70^\circ$ была сделана путем интегрирования формулы (1): $I_\mu = 5.73 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В мюонной радиографии картину «изображения» объекта исследования в лучах мюонов, падающих на детектор под зенитным углом θ и азимутальным углом φ , принято отображать в переменных tx и ty : $tx = \text{tg}(\theta) \cdot \cos(\varphi)$ и $ty = \text{tg}(\theta) \cdot \sin(\varphi)$.

На рис. 2 изображен отклик детектора в координатах $TX - TY$ для случая, когда детектор сдвинут горизонтально на 3 м от точки вертикальной проекции центра сферы с $R = 75$ см (рис. 1). У симметричного распределения числа мюонов (случай однородного грунта без пустот) на этом графике есть небольшой дополнительный пик при $ty = 0$ и $tx = 0.3 - 0.4$, что соответствует $\varphi = 0^\circ$ и $\theta = 17^\circ - 22^\circ$ и является следом от имеющейся сферической пустоты.

В таком представлении изменения в угловом распределении мюонов можно иногда заметить, но трудно количественно оценить, насколько отличается результат от картины для заранее предполагаемой конфигурации объекта (без неоднородностей вещества). Для сравнения модельных расчетов в упомянутых двух случаях удобно использовать двумерную картину углового распределения мюонов по TX

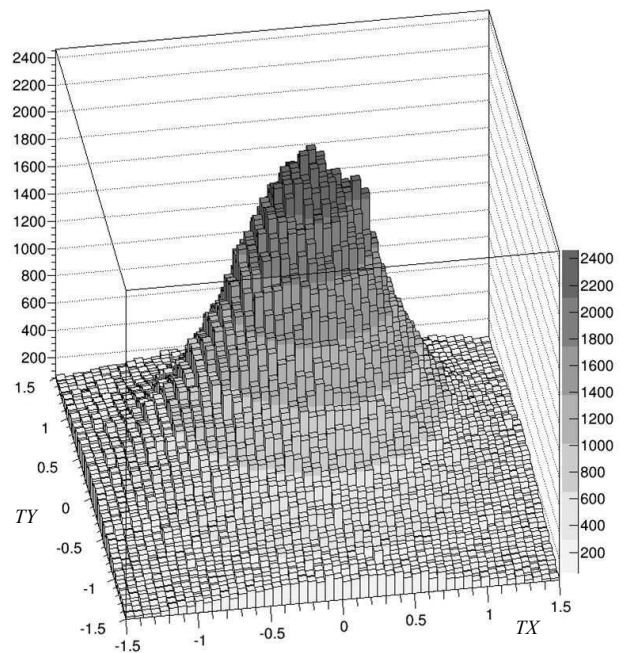


Рис. 2. Распределение числа мюонов, зафиксированных детектором под зенитным углом θ и азимутальным углом φ (в переменных TX и TY) для случая, когда детектор сдвинут горизонтально на 3 м от точки вертикальной проекции центра сферы с $R = 75$ см

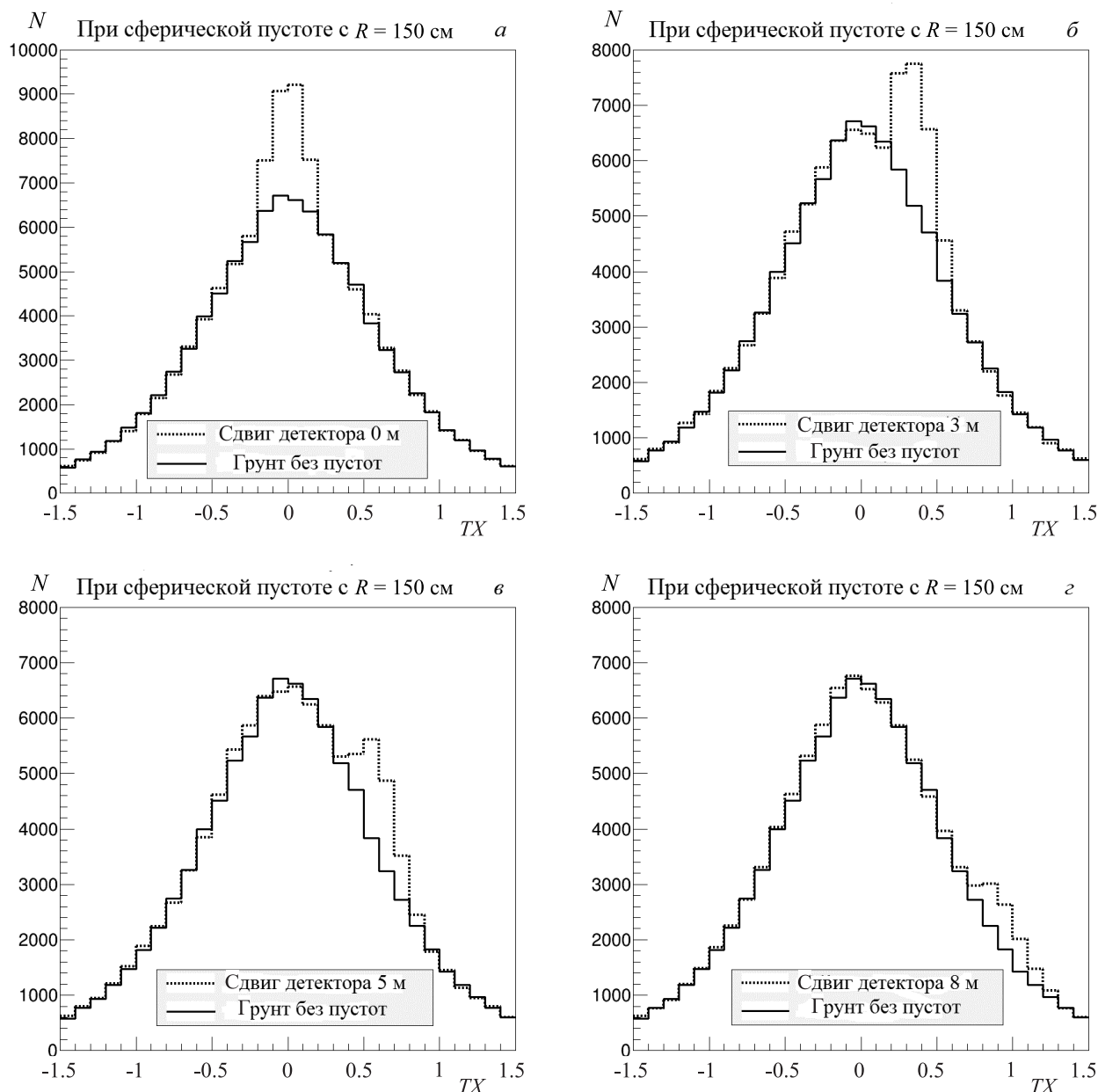


Рис. 3. Распределение мюонов по величине T_X в секущей плоскости $T_Y = 0$ в случае имеющейся сферической пустоты в грунте радиусом $R = 150$ см для 4 положений детектора (рис. 1): *a* — смещение детектора по оси X от проекции центра сферы на горизонтальную плоскость наблюдения равно 0 м; *б* — аналогичное смещение детектора по оси R равно 3 м; *в* — аналогичное смещение детектора по оси X равно 5 м; *г* — аналогичное смещение детектора по оси X равно 8 м

Таблица. Величины эффекта увеличения числа зарегистрированных мюонов из-за наличия пустоты в грунте

Сдвиг детектора от сферы, м	Для пустой сферы $R = 150$ см		Для пустой сферы $R = 75$ см	
	Сектор по зенитному углу θ , °	Превышение потока мюонов, в %	Сектор по зенитному углу θ , °	Превышение потока мюонов, в %
0	± 11	27 ± 2	± 6	10 ± 2
3	14–31	42 ± 3	16–26	10 ± 5
5	22–38	32 ± 4	27–35	18 ± 4
8	38–50	38 ± 7	42–48	12 ± 5

в плоскости (в данном случае вертикальной) сечения гистограммы на рис. 2 при $T_Y = 0$. Далее будем анализировать такие распределения.

На рис. 3 показано распределение мюонов по величине T_X в секущей плоскости $T_Y = 0$ в случае имеющейся сферической пустоты в грунте радиусом $R = 150$ см для 4 положений детектора (рис. 1).

На рис. 3, *a* эффект от пустоты в грунте хорошо виден при зенитных углах $\pm 11^\circ$, на рис. 3, *б* такой эффект виден при зенитных углах $14^\circ - 31^\circ$, на рис. 3, *в* эффект заметен при углах $22^\circ - 38^\circ$, на рис. 3, *г* эффект невелик, но заметен при углах $38^\circ - 50^\circ$. Величины эффекта в зависимости от положения такой пустоты в грунте сведены в таблице.

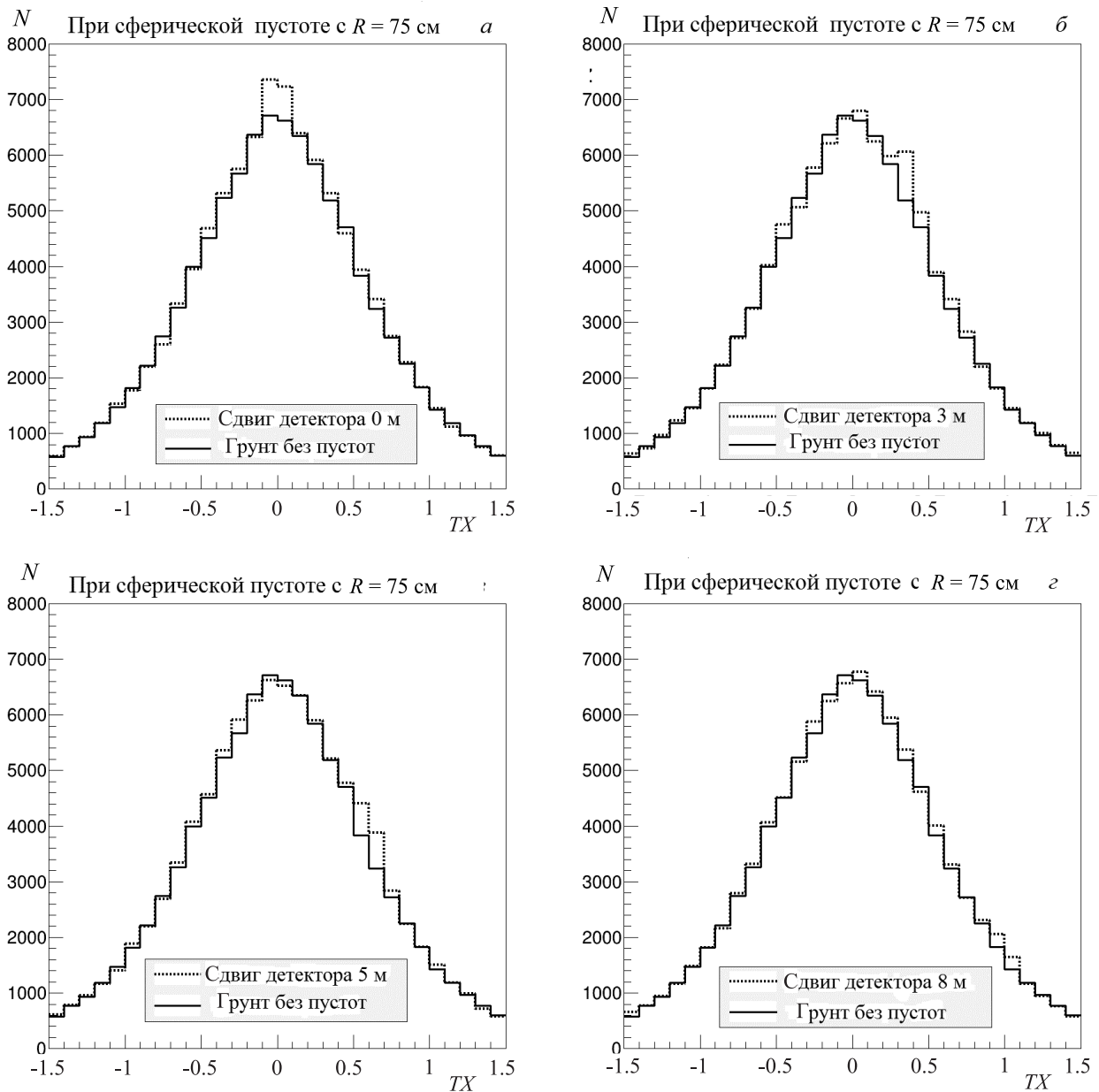


Рис. 4. Распределение мюонов по величине TX в секущей плоскости $TU = 0$ в случае имеющейся сферической пустоты в грунте радиусом $R = 75$ см для 4 положений детектора (рис. 1): *a* — смещение детектора по оси X от проекции центра сферы на горизонтальную плоскость наблюдения равно 0 м; *б* — аналогичное смещение детектора по оси X равно 3 м; *в* — аналогичное смещение детектора по оси X равно 5 м; *г* — аналогичное смещение детектора по оси X равно 8 м

На рис. 4 показано распределение мюонов по величине TX в секущей плоскости $TU = 0$ в случае имеющейся меньшей сферической пустоты в грунте радиусом $R = 75$ см для 4 положений детектора (рис. 1). На рис. 4, *a* эффект от пустоты в грунте заметен при зенитных углах $\pm 6^\circ$, на рис. 4, *б* такой эффект может быть виден при зенитных углах $16^\circ - 26^\circ$, на рис. 4, *в* эффект слабо заметен при углах $27^\circ - 35^\circ$, на рис. 4, *г* эффект почти незаметен глазом там, где должен проявиться (при углах $42^\circ - 48^\circ$), но строго количественно приток мюонов все-таки присутствует (см. таблицу). Все величины эффекта в зависимости от положения такой пустоты в грунте также сведены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное моделирование позволяет судить о чувствительности детекторов мюонной радиографии к структурности объекта — в данном случае к пустотам в грунте. Оно показало, какой величины сигналы о таких пустотах можно ожидать в изображениях, даваемых детекторами, в зависимости от величины пустой полости и от взаимного расположения детектора и объекта-структуры. Используемая в данных расчетах толщина грунта близка к встречающейся в реальных ситуациях при исследовании, например, архитектурных объектов [17]. Полученные здесь результаты могут быть полезны и в других экспериментах для оценки оптимальной геометрической постановки детекторов и возможной получаемой полезной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Allkofer O.C., Grieder P.K.F.* Cosmic Rays on Earth. Physics Data. (Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, Karlsruhe, Germany) 1984.
2. *Berlinger J.* et al. (Particle Data Group) // Phys. Rev.D. 2012. **86**. P. 010001.
3. *Bugaev E. V., Misaki A., Naumov V. A.* et al. // Phys. Rev. D. 1998. **58**. P. 054001.
4. *Aglietta M., Alyea E.D., Antonioli P.* et al. (LVD Collaboration) // Phys. Atom. Nucl. 2003. **66**. P. 123.
5. *Nishiyaa R., Ariga A., Ariga T.* et al. // Geophysical Research Letters. 2017. **44**, N 12, P. 6244.
6. *Kedar S., Tanaka H. K. M., Naudet C. J.* et al. // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2013. **2**. P. 157.
7. *Morishima K., Kuno M., Nishio A.* et al. // Nature. 2017. **552**. P. 386.
8. *Tanaka H. K. M.* // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2013. **2**. P. 79.
9. *Jourde K., Gibert D., Marteau J.* et al. // Scientific Reports. 2016. **6**. P. 23054.
10. *Durham J. M., Guardincerri E., Morris C. L.* et al. // AIP Advances. 2015. **5**. P. 067111.
11. *Bryman D., Bueno J., Jansen J.* // EPJ Web Conf. 2016. **125**. P. 02022.
12. *Fukuda T., Fukunaga S., Ishida H.* et al. // J. Instrum. 2013. **8**. P01023.
13. *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.
15. *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.
16. *Александров А. Б., Баклагин С. А., Галкин В. И.* и др. // Изв. РАН. Сер. физ., 2017. **81**, N 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.)
17. *Abiev A., Bagulya A., Chernyavskiy M.* et al. // APPLIED SCIENCES-BASEL. 2019. **9**, N 10. P. 2040.
18. *Abiev A., Bagulya A., Chernyavskiy M.* et al. // Physics of Atomic Nuclei, 2019. **82**, N 6. P. 804.
19. *Geant4 Collaboration* // Geant4 User's Guide for Application Developers. <https://geant4.web.cern.ch/>
20. *Agostinelli S.* et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2003. **506**. P. 250.
21. *Allison J., Amakoc K., Apostolakis J.* et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2016. **835**. P. 186.
22. *Clarkson A., Hamilton D. J., Hoek M.* et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2014. **746**. P. 64.
23. *Bogdanova L. N., Gavrillov M. G., Kornoukhov V. N., Starostin A. S.* // Physics of Atomic Nuclei. 2006. **69**. P. 1293.
24. *Miayke S.* // Proc. of the 13-th International Cosmic Ray Conference, Denver. 1973. **5**. P. 3658.
25. *Allkofer O. C., Dau W. D., Jokisch H.* et al. // Nucl. Phys. 1985. **B259**. P. 1.
26. *Volkova L. V., Zatsepin G. T., Kuz'michev L. A.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1979. **29**. P. 645.
27. *Butkevich A. V., Dedenko L. G., Zheleznykh I. M.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1989. **50**. P. 90.
28. *Herman G. T.* // Fundamentals of Computerized Tomography: Image Reconstruction from Projections (New York: Springer Publishing Company) 2009.

An Estimate of the Sensitivity of Muon Radiography Detectors to Voids in the Ground

V. I. Galkin^{1,a}, A. K. Managadze^{2,b}¹Department of Space Physics, Faculty of Physics; ²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.E-mail: ^av_i_galkin@mail.ru, ^bakmanag48@mail.ru.

Model simulations of test experiments on muon radiography for several configurations of voids in the ground and different muon detector positions are presented. The sensitivity of the method for the considered cases is estimated. This study lays the basis for quantitative analysis of data in muon radiography and can be used for planning future experiments.

Keywords: muon radiography, detector sensitivity, registration method.

PACS: 25.30.Mr.

Received 31 May 2020.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 5. Pp. 434–439.

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.