

ЧИСЛЕННЫЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В АТМОСФЕРЕ

Е.А. Маурчев, А.В. Германенко, Ю.В. Балабин, Е.А. Михалко, Б.Б. Гвоздевский

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия
maurchev1987@gmail.com

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHODS FOR INVESTIGATING COSMIC RAYS IN THE EARTH'S ATMOSPHERE

E.A. Maurchev, A.V. Germanenko, Yu. V. Balabin, E.A. Mikhalko, B.B. Gvozdevsky

Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia
maurchev1987@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются лишь некоторые способы исследования космических лучей в атмосфере Земли. Приводятся основные методики измерения характеристик вторичного излучения, применяемые на станции нейтронного монитора в Апатитах. Рассматриваются модели этого оборудования и их расчетные функции эффективности регистрации. Частично рассказывается о более сложной модели прохождения протонов через атмосферу Земли.

Ключевые слова: космические лучи, детекторы корпускулярного излучения, физика частиц, метод Монте-Карло.

Abstract. The paper considers only some methods of studying cosmic rays in the Earth's atmosphere. The main methods for measuring characteristics of secondary radiation used at the neutron monitor station in Apatity are presented. Models of this equipment and their calculated registration efficiency functions are considered. A more complex model of proton passage through the Earth's atmosphere is partially described.

Keywords: cosmic rays, particle detectors, particle physics, Monte Carlo method.

ВВЕДЕНИЕ

На станции нейтронного монитора (НМ) в Апатитах для изучения космических лучей (КЛ) в атмосфере Земли, их состава и особенностей взаимодействия с окружающим веществом используются как экспериментальные, так и численные методы. К первым относится комплексная система сбора данных [Балабин Ю.В. и др., 2020], которая включает в себя следующие детекторы корпускулярного излучения.

1. Нейтронный монитор [Балабин и др., 2015]. Реализованы НМ двух типов — свинцовый и бес-свинцовый.

2. Детекторы заряженной компоненты.

3. Сцинтилляционные NaI (Tl) гамма-детекторы [Балабин и др., 2019] — устройства, принцип работы которых основан на преобразовании энергии частицы в оптические фотоны.

4. Мюонный телескоп. В лаборатории космических лучей установлены два современных устройства такого типа — в Апатитах и Баренцбурге на арх. Шпицберген.

5. Узконаправленный детектор нейтронов — экспериментальная установка, особенностью которой является наличие приемного окна и поглощающего тепловые нейтроны материала, позволяющая при необходимости измерять направленность потока нейтронов с энергией ниже 1 МэВ.

Следует заметить, что все детектирующее оборудование оснащено высокоскоростными системами сбора данных, спроектированными и реализованными непосредственно авторами работы при помощи современной микропроцессорной техники.

Численные модели, необходимые для дополнения экспериментальной базы, реализованы при помощи метода Монте-Карло [Соболь, 1985], точнее — в работе используется среда для разработки программ GEANT4 [Agostinelli et al., 2003]. Выбор в его

пользу был сделан, поскольку в нем реализованы все необходимые процессы взаимодействий, удобный подход к реализации геометрии при помощи языка C++ и самый немаловажный плюс — наборы классов, распространяющихся абсолютно бесплатно.

Кратко можно сказать, что после инициализации параметров геометрии, первичного источника и видов частиц алгоритм моделирования сводится к расчету сечений и типа взаимодействий, а также средних длин пробега.

ПРИМЕРЫ ДЕТЕКТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ФУНКЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ

Первым можно рассмотреть сцинтилляционный NaI (Tl) детектор гамма — устройство, активное вещество которого способно генерировать фотоны посредством реакций с ионизирующим излучением (электроны, позитроны, протоны) и гамма-квантами. Помимо кристалла, такое оборудование также включает в себя фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), необходимый для преобразования вспышки света в электрический импульс, и систему сбора данных. Детекторы такого типа, используемые в задачах гамма-спектроскопии, например, в мониторинге возрастания приземного фона во время осадков, имеют большую эффективность регистрации и находят применение в тех случаях, когда не требуется высокое энергетическое разрешение. В таких детекторах энергия и интенсивность гамма-квантов определяются с помощью вторичных заряженных частиц (электронов и позитронов), возникающих в результате взаимодействий самих гамма-квантов с веществом. Визуализация модели такого детектора, геометрия которого соответствует геометрии реального прибора, используемого в лаборатории космических лучей, представлена на рис. 1. Рассчитанные функции отклика показаны на рис. 2.

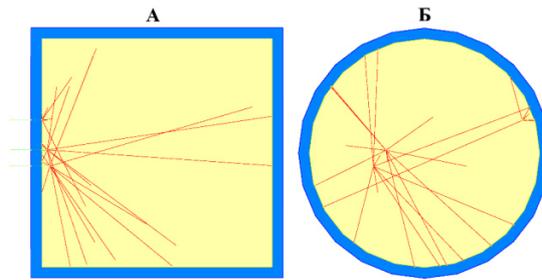


Рис. 1. Модель сцинтилляционного NaI (Tl) детектора в проекции YZ (а) и проекции X-Y (б). Желтый цвет — рабочая область, синий — алюминиевый кожух, зеленый — треки гамма-квантов, красный — треки оптических фотонов. Для удобства процессы отражения от границ поверхностей отключены, а также установлено значение световыхода $S=100$ оптических фотонов/МэВ

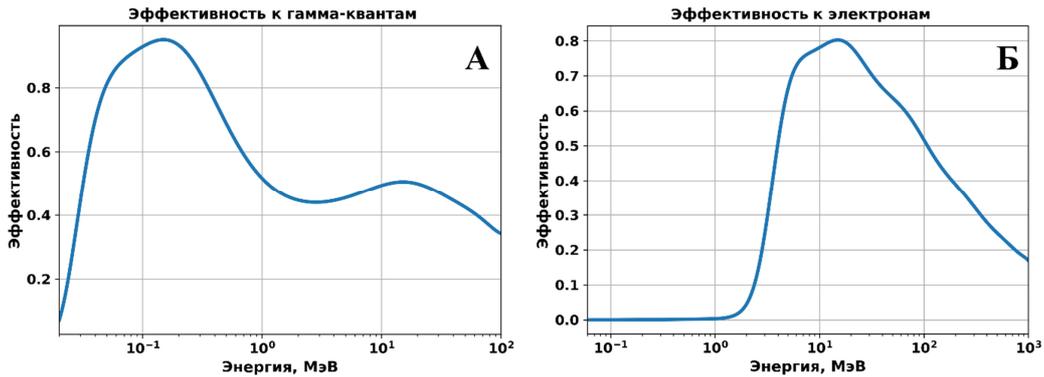


Рис. 2. Функции эффективности регистрации в виде отношения числа зарегистрированных частиц к числу частиц в первичном потоке, полученные в результате моделирования взаимодействий пучков моноэнергичных частиц при прохождении через вещество сцинтилляционного NaI (Tl) детектора цилиндрической формы размерами $h_1=63$ мм и $\varnothing=63$ мм гамма-квантов в диапазоне энергий 0.02–100 МэВ (а) и электронов в диапазоне энергий 0.06–1000 МэВ (б)

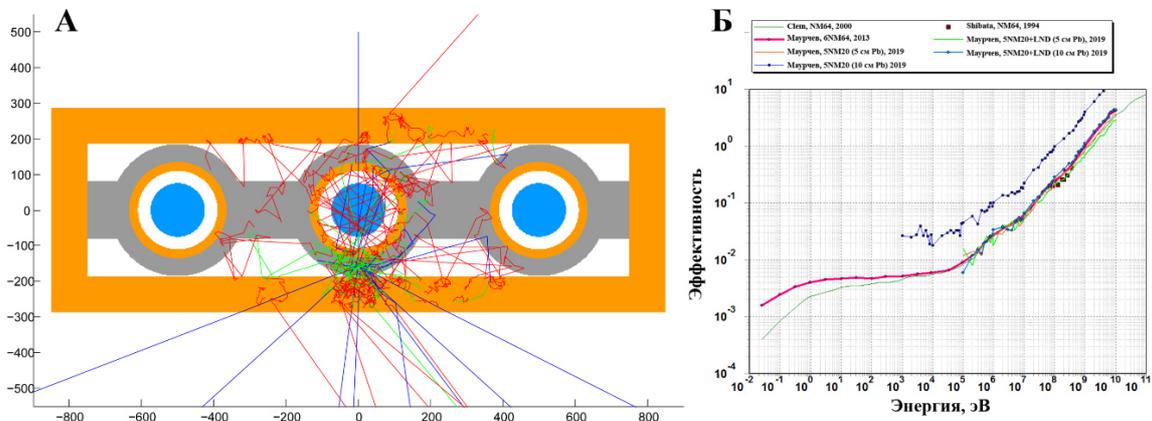


Рис. 3. Фронтальная проекция модели одной секции НМ (а). Сверху на полиэтилен падает нейтрон с энергией 10 ГэВ. В результате неупругого столкновения со свинцом рождается каскад нуклонов, здесь показаны только нейтроны. Различными цветами обозначены энергетические диапазоны частиц: синий — энергия выше 100 МэВ, зеленый — от 100 кэВ до 100 МэВ, красный — ниже 100 кэВ. Зависимость эффективности регистрации стандартного НМ (б) от энергии нейтронов, полученная в результате моделирования прохождения потоков нейтронов с энергией в интервале от 10^{-2} до 10^{10} эВ. При сравнении с полученными ранее результатами наблюдается хорошее совпадение. При низких энергиях наблюдается расхождение из-за различия в используемых сечениях взаимодействий

Стандартный НМ представляет собой устройство, состоящее из полиэтиленового замедлителя, свинцового генератора, отражателей и пропорциональных счетчиков, чувствительных к нейтронам (рис. 3). Эти детекторы занимают ключевую позицию в области радиационной безопасности, космической физики, изучения солнечно-земных связей и космической погоды. Именно по этой причине сегодня проводится модернизация систем регистрации

НМ и проявляется интерес к процессам, происходящим при взаимодействии частиц с его конструкцией. При помощи разработанной нами модели рассчитана функция эффективности регистрации.

Одним из основных результатов является модель расчета прохождения протонов первичных КЛ через атмосферу Земли и исследования образований каскадов и вторичных КЛ. В основе реализации этой модели лежит теория распространения частиц раз-

личного типа, а для расчетов процессов взаимодействий используется набор моделей [Amelin et al., 1990; Amelin et al., 2001, Bertini et al., 1971; Heikkinen et al., 2003, Garny et al., 2009]. С основными результатами расчетов можно ознакомиться в работах [Маурчев и др., 2019].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование космических лучей по-прежнему остается актуальной и интересной задачей. Эта научная отрасль имеет множество прикладных и фундаментальных направлений, в которых можно реализовывать возможности самых разных методик — как экспериментальных, так и численных. В наших работах мы стараемся использовать самые современные достижения в этой области. Так, в системах сбора данных это микропроцессорная техника, а для представления данных — средства баз данных и публикаций на веб-серверах [URL]. Следует заметить, что нами самостоятельно разрабатывается и собирается периферия, а также производится написание кода для микроконтроллеров. Возможности численного моделирования и программ обработки данных вообще можно считать безграничными и объема данной статьи будет слишком мало для их описания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В. Большие и малые множественности на нейтронных мониторах: их различия. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79, № 5. С. 708.

Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В. и др. Суточная и сезонная вариации мягкого гамма-излучения в нижней атмосфере. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83, № 5. С. 655–658.

Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В. и др. Компактный мюонный телескоп для мониторинга потоков вторичных космических лучей. *Приборы и техника эксперимента.* 2020. № 6. С. 71–75.

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. и др. Расчет скорости ионизации вещества атмосферы Земли протонами галактических и солнечных космических лучей. *Солнечно-земная физика.* 2019. Т. 5, № 3. С. 81–88.

Приборы и техника эксперимента. 2020. № 6. С. 71–75.

Соболь И.М. *Метод Монте-Карло.* 4-е изд. М.: Наука, 1985. 80 с.

Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. Geant4 — a Simulation Toolkit. *Nuclear Instruments and Methods.* 2003. Vol. 506, iss. 3. P. 250–303.

Amelin N.S., Armesto N. Monte Carlo model for nuclear collisions from SPS to LHC energies. *European Physical J. C: Particles and Fields.* 2001. Vol. 22, iss. 1. P. 149–163.

Bertini H.W., Guthrie M.P. Results from Medium-energy intra-nuclear-cascade calculation. *Nucl. Phys.* 1971. Vol. 169, iss. 3. P. 670–672.

Garny S., Leuthold G., Mares V., et al. GEANT4 transport calculations for neutrons and photons below 15 MeV. *IEEE Trans. Nuclear Sci.* 2009. Vol. 56, no. 4. P. 2392–2396.

Heikkinen A., Stepanov N., Wellish J.P. Bertini intra-nuclear cascade implementation in Geant4. *Computing in High Energy and Nuclear Physics* (ePrint nucl-th/0306008). 2003. P. 1–7.

URL: <https://cosmicray.pgia.ru/index.html>.

URL: <https://ruscosmics.ru>.