

МОДЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ RUSCOSMIC

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

RUSCOSMIC AS A MODELING COMPLEX FOR INVESTIGATION OF COSMIC RAYS

Е.А. Maurchev, Yu.V. Balabin, B.B. Gvozdevsky

В данной работе представлена концепция нового программного комплекса RUSCOSMICS, основанного на GEANT4 и представляющего собой набор различных численных моделей для исследования прохождения космических лучей (КЛ) через вещество. Получены функции откликов основных детекторов излучения, а также характеристики потоков вторичных КЛ.

In this work a concept of a new software system RUSCOSMICS, based GEANT4 and represents a set of various numerical models to study the passage of cosmic rays (CR) through a substance is presented. The response functions of main radiation detectors and a secondary CR flux characteristics are obtained.

Введение

В настоящее время исследование КЛ проводятся самыми различными способами. С самого начала это были преимущественно экспериментальные методы (шары-зонды, детекторы излучения различного типа, спутники). Одной из самых современных и надежных наземных систем регистрации космических лучей является международная сеть нейтронных мониторов. По данным этой сети определяются характеристики релятивистских солнечных протонов, зарегистрированных во время событий солнечных космических лучей (СКЛ) посредством моделирования возрастаний приземного вана вторичных космических лучей (события GLE [Shea, Smart, 1982; Vashenyuk et al., 2008]). Также традиционно запускаются шары-зонды [Bazilevskaya et al., 2008]. С началом компьютеризации активно развивается методика изучения распространения КЛ в веществе с помощью численного метода Монте-Карло. Нами был разработан программный комплекс RUSCOSMICS, включающий в себя модели детекторов различного типа, а также модель прохождения первичных КЛ через атмосферу Земли для получения информации о каскадах вторичных КЛ. Основой является пакет GEANT4 [Agostinelli et al., 2003], из которого наследуются классы, отвечающие за отображение процесса взаимодействия частиц с веществом, построение геометрии, задание начальных параметров, сбора информации о ходе моделирования, состоянии частиц и др.

Самой первой задачей в данной работе являлось детальное изучение свойств детектирующего оборудования на станции космических лучей г. Апатиты. С целью решения этой задачи были созданы программные модули, представляющие собой модели нейтронного монитора (НМ), счетчиков гейгера, сцинтилляционных детекторов с геометрией и свойствами материалов максимально приближенным к реальному.

В результате моделирования прохождения потока нейтронов через нейтронный монитор была получена функция отклика, а также детально изучены свойства замедлителя и свинцового генератора. Результаты сравнивались с работами, проводимыми ранее и в настоящее время, показав хорошее согла-

сие в вычислениях. Современные сечения взаимодействий, используемые при моделировании, позволили более точно изучить функцию отклика нейтронного монитора в диапазоне энергий от 10 МэВ до эпитептермальных. Параллельно этим расчетам проводилось моделирование множественности в нейтронном мониторе, результаты данной работы подтвердили предположение, что феномен вызывается не единственной частицей, попадающей в свинцовый генератор НМ, а целым облаком частиц.

Моделирование сцинтилляционных детекторов гамма-квантов стало необходимым, поскольку на станции космических лучей вот уже в течение нескольких лет функционирует система мониторинга рентгеновского излучения, с помощью которой были выявлены возрастания во время осадков. Результатами вычислений с помощью GEANT4 являются функции отклика NaI детекторов различной геометрии. Подобные работы проводились и ранее, но наши методы отличаются современным подходом и совершенно новой концепцией, позволяющей учесть больше факторов при расчете прохождения частиц через вещество.

Вторым этапом было создание собственного программного модуля для расчета прохождения частиц различных энергий через атмосферу Земли. Данный шаг позволил не только использовать постоянно обновляющиеся данные для моделирования, но и расширить границы применения, поскольку без труда можно менять состояние самой модели (изменять физические свойства вещества, добавлять различные поля и т. д.). Далее проводились расчеты как прохождение галактических космических лучей через атмосферу Земли, так и развитие каскадов частиц во время некоторых событий GLE. Результатом данных работ стала база данных энергетических спектров вторичного космического излучения для различных высот. Данные расчеты могут применяться как для оценки скорости ионизации при вычислении эквивалентной дозы, так и для детального исследования развития каскадов и поиска новых особенностей во время GLE. Работы подобного рода проводились и другими исследователями с помощью PLANETOCOSMICS, результаты нашего моделирования сверялись с ними, а также с эксперимен-

тальными данными, полученными из данных полев шаров-зондов, с которыми они имеют хорошее согласие.

Модель сцинтилляционного детектора NaI

В детекторах подобного типа энергия и интенсивность гамма-квантов определяются с помощью вторичных заряженных частиц (электронов и позитронов), которые возникают в результате взаимодействия самих гамма-квантов с веществом. Как уже было сказано выше во введении, в основе всех моделей комплекса лежит метод Монте-Карло и для выбора некоторое значение $x \in (x_1, x_2)$ из нормализованной функции плотности вероятности $f(x)$:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(x) g_i(x)$$

где $\alpha_i > 0$ – вероятность выборки нормированной функции плотности вероятности $f_i(x)$ и $0 \leq g_i(x) \leq 1$. Тогда, произведя выборку случайного целого с вероятностью, пропорциональной α_i и выбрав значение x_0 из распределения $f_i(x)$, можно рассчитать $x = x_0$ с вероятностью $g_i(x_0)$. В случае отклонения значения схема расчета повторяется сначала. Подробное математическое описание модели является слишком громоздким и здесь не представлено. С помощью вышеописанной концепции были смоделированы три сцинтилляционных детектора с геометрическими размерами 2×6.3 см и 10×15 см. В результате моделирования прохождения моноэнергичных пучков гамма-квантов через сцинтилляционные детекторы с описанной выше геометрией получены эффективности регистрации, представленные на рис. 1.

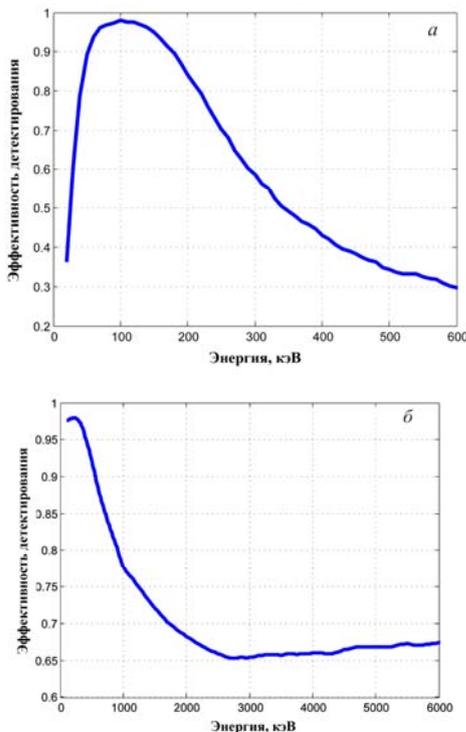


Рис. 1. Эффективности детектирования гамма-квантов, полученные в результате моделирования взаимодействий частиц с сцинтилляционными детекторами типоразмерами 2×6.3 см (а) и 10×15 см (б).

Модель нейтронного монитора

Геометрические параметры модели идентичны параметрам реального НМ, внешний вид модели в фронтальной плоскости и трекинг визуализированы на рис. 2, полученная в результате моделирования функция отклика представлена на рис. 3. Поток моноэнергичных первичных нейтронов падает перпендикулярно на верхнюю плоскость детектора, распределение частиц носит равномерный характер, количество частиц в потоке задавалось равным 500000 на одно значение энергии.

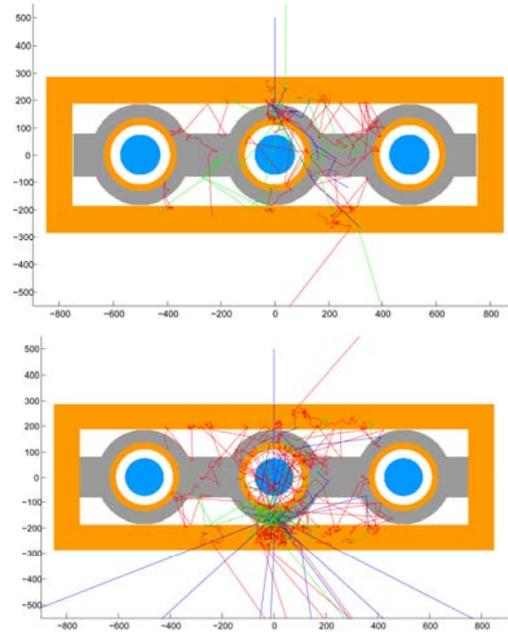


Рис. 2. На данном рисунке представлена визуализация фронтальной проекции модели одной секции НМ. Сверху на полиэтилен падают нейтроны с энергиями 300 МэВ (вверху) и 10 ГэВ (внизу), соответственно. В результате неупругого столкновения со свинцом рождается каскад нуклов, здесь отображены только нейтроны. Различными цветами обозначены энергетические диапазоны частиц. Синим цветом – с энергией выше 100 МэВ, зеленым – от 100 кэВ до 100 МэВ и красным – ниже 100 кэВ. На иллюстрациях хорошо видны процессы образования каскада, дрейфа нейтронов, множества упругих столкновений, остановки и поглощения. Цифры на осях позволяют оценить линейные размеры установки, единицы измерения заданы в миллиметрах.

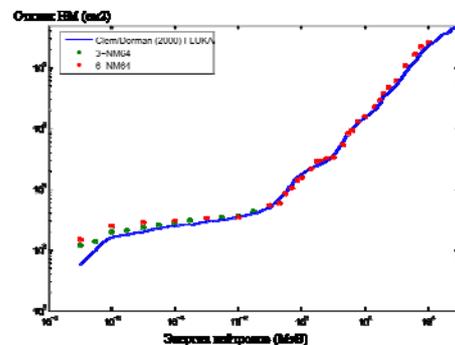


Рис. 3. Функция отклика НМ, полученная в результате моделирования прохождения потоков моноэнергичных нейтронов через систему детектора. Проводится сравнение с полученной ранее [Clem et al., 2000] с помощью пакета FLUKA, видно хорошее совпадение. Различие в «хвосте» возникает из-за разных моделей взаимодействий нейтронов на низких энергиях, а также разных сечений взаимодействий.

Моделирование прохождения КЛ через атмосферу Земли

Одной из самых сложных в программном комплексе RUSCOSMICS является модель для расчета прохождения первичных протонов КЛ через атмосферу Земли и исследования образований каскадов вторичных КЛ.

Для построения модели применялась концепция так называемой «плоской» геометрии, когда выделяется столб атмосферы Земли на заданной широте и долготе, задается его высота и длина граней, а также вычисляются физические параметры каждого слоя (процентное соотношение масс составляющих элементов, плотность, давление и температура) с помощью NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]. На границе определяется модельный источник частиц с заданной интенсивностью и спектральной характеристикой. При прохождении частиц через вещество атмосферы рассчитываются параметры каскадов вторичных КЛ. Модельные данные сравниваются с экспериментальными, полученными в результате запуска шаров-зондов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. Geant4: A simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 506 (3): 250. Bibcode: 2003NIMPA.506..250A, doi: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

Bazilevskaya G.A. et al. Cosmic ray Induced Ion Production in the Atmosphere // Space Sci Rev. 2008. P. 137.

Clem J.M., Dorman L.I., Neutron monitor response function // Space Science Rev. 2000. V. 93. P. 335–359.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A12. P. 1468, doi: 10.1029/2002JA009430.

Shea M.A., Smart D.F. Possible evidence for a rigidity dependent release of relativistic protons from the solar corona // Space Sci. Rev. 1982. V. 32. P. 251–271.

Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Relativistic solar cosmic ray dynamics in large ground level events // Proc. 21-st ECRS, Kosice, Slovakia, 9–12 September, 2008., Inst. of Exp. Phys., Slovak Academy of Sci. 2009. P. 264–268.

Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия