
**МОДЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ RUSCOSMIC
RUSCOSMIC — THE NEW SOFTWARE TOOLBOX FOR DETAILED ANALYSIS OF
COSMIC RAY INTERACTIONS WITH MATTER**

Е.А. Маурчев

*Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, maurchev@pgia.ru*

Ю.В. Балабин

*Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, balabin@pgia.ru*

E.A. Maurchev

*Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, maurchev@pgia.ru*

Yu.V. Balabin

*Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, balabin@pgia.ru*

Аннотация. В настоящее время существует значительное разнообразие методик для исследования характеристик потоков как первичных, так и вторичных космических лучей (КЛ). Основными являются экспериментальные методы, с использованием разных детекторов, однако, благодаря современным компьютерным технологиям, экспериментальные методы все чаще совмещаются с численными. Данный шаг позволяет получить наибольшее количество информации о интересующем процессе (явлении) и сделать, соответственно, наиболее точные выводы. В работе представлена концепция нового программного комплекса RUSCOSMIC, основанного на пакете GEANT4 и представляющего собой набор различных численных моделей для исследования прохождения КЛ через вещество различных систем (детекторы излучения, атмосфера Земли). Получены и приведены функции откликов основных детекторов излучения, а также некоторые типовые характеристики потоков вторичных КЛ. Также представлены результаты, демонстрирующие работу модуля верификации вычислений экспериментальными данными.

Ключевые слова: космические лучи, техника эксперимента, численное моделирование, метод Монте-Карло, детекторы излучения, взаимодействие частиц с веществом.

Abstract. At present, cosmic ray (CR) physics uses a considerable variety of methods for studying CR characteristics, and both primary and secondary fluxes, respectively. Experimental methods make the main contribution, using various types of detectors, but numerical methods increasingly complement it due to the active development in computer technology. This approach provides researchers with the most extensive information about details of the process or phenomenon and allows us to make the most competent conclusions. This paper presents a concept of the RUSCOSMIC software package based on the GEANT4 toolkit and representing a range of different numerical models for studying the CR passage through a matter of different systems. The obtained results represent response functions of the main radiation detectors as well as some typical characteristics of secondary CR fluxes. Comparative results also show the operation of the module verification of calculations with experimental data.

Keywords: cosmic rays, experimental techniques, numerical methods, Monte Carlo method, the radiation detectors, particle interaction with matter.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследования космических лучей (КЛ) проводятся разными способами. Первоначально это были в основном экспериментальные методы, широко используемые до сих пор. Традиционно запускаются шары-зонды с установленными на них детекторами [Bazilevskaya et al., 2008], а международная сеть нейтронных мониторов является одной из самых современных и надежных наземных систем регистрации космических лучей. По данным этой сети определяются характеристики релятивистских солнечных протонов, зарегистрированных во время событий солнечных космических лучей (СКЛ), посредством моделирования возрастных

приземного фона вторичных космических лучей (события GLE [Vashenyuk et al., 2009; Shea, Smart, 1982]).

С начала компьютеризации активно развивается методика изучения распространения КЛ в веществе с помощью численного метода Монте-Карло. Нами был разработан программный комплекс RUSCOSMIC, включающий в себя модели детекторов разных типов, 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, сбор информации о ходе моделирования, состоянии частиц и др.

Первым этапом данной работы являлось детальное изучение свойств детектирующего оборудования на станции космических лучей в г. Апатиты. С этой целью были созданы программные модули, представляющие собой модели нейтронного монитора (НМ), счетчиков Гейгера, сцинтилляционных детекторов с геометрией и свойствами материалов, максимально приближенным к реальным.

При моделировании прохождения потока нейтронов через нейтронный монитор была получена функция отклика, а также детально изучены свойства замедлителя и свинцового генератора. Сравнение наших результатов с результатами работ, проводившихся ранее и ведущихся в настоящее время, показало хорошее согласие. Современные сечения взаимодействий, используемые при моделировании, позволили более детально изучить функцию отклика нейтронного монитора в диапазоне энергий от 10 МэВ до эпитептермальных. Проведенное параллельно моделирование множественности в нейтронном мониторе подтвердило 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 КЛ уже в течение нескольких лет функционирует система мониторинга рентгеновского излучения, благодаря которой были выявлены его возрастания во время осадков. С помощью GEANT4 вычислены функции отклика NaI-детекторов различной геометрии. Подобные работы, разумеется, проводились и ранее, однако наше исследование отличают современный подход и совершенно новая концепция, позволяющая 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. Это позволило не только использовать для моделирования постоянно обновляющиеся данные, 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 прохождения галактических космических лучей (ГКЛ) через атмосферу Земли и развития каскадов частиц во время некоторых событий GLE. В результате создана 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 во время GLE и поиска их новых особенностей. Результаты моделирования сверялись с результатами подобных исследований, проводившихся с использованием пакета PLANETOCOSMICS [Maurchev et al., 2011], а также с полученными с помощью шаров-зондов экспериментальными данными, с которыми наблюдается хорошее согласие.

МОДЕЛЬ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА NaI

В детекторах такого типа энергия и интенсивность гамма-квантов определяются с помощью вто-

ричных заряженных частиц (электронов и позитронов), которые возникают в результате взаимодействий самих гамма-квантов с веществом. Как уже было сказано 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 $f(x)$:

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

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. На основе вышеописанной концепции были смоделированы два сцинтилляционных детектора с геометрическими размерами 6.3×2 см и 15×10 см. В результате моделирования прохождения моноэнергичных пучков гамма-квантов через сцинтилляционные детекторы с описанной выше геометрией оценена эффективность регистрации гамма-квантов (рис. 1).

МОДЕЛЬ НЕЙТРОННОГО МОНИТОРА

Геометрические параметры модели идентичны параметрам реального НМ, внешний вид модели визуализирован на рис. 2, типовой трекинг представлен на рис. 3. Поток моноэнергичных первичных нейтронов падает перпендикулярно верхней плоскости детектора, распределение частиц носит равномерный характер, количество частиц в потоке равно 500 000 на одно значение энергии. Полученная в результате моделирования функция отклика представлена на рис. 4.

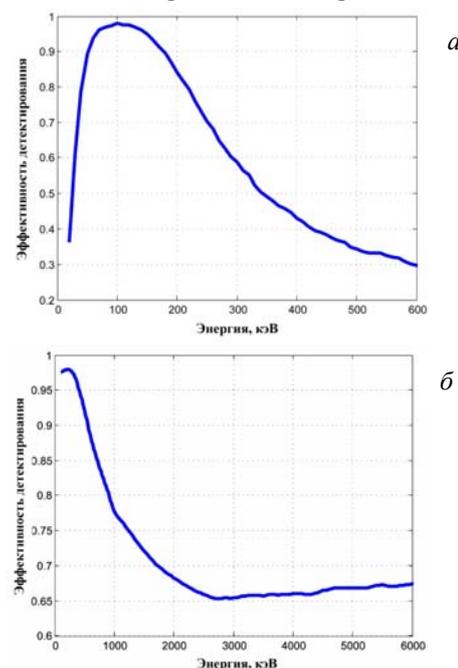


Рис. 1. Эффективность детектирования гамма-квантов, оцененная в результате моделирования взаимодействий частиц с сцинтилляционными детекторами типоразмерами 6.3×2 (а) и 15×10 см (б)

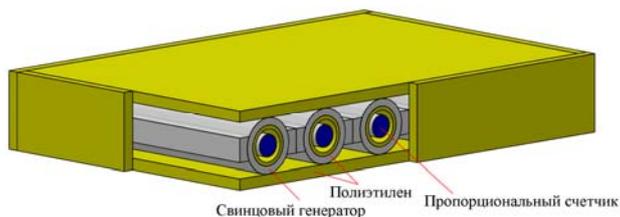


Рис. 2. Визуализация модели стандартного НМ, состоящего из полиэтиленового замедлителя, свинцового генератора, полиэтиленового отражателя и пропорциональных $^{10}\text{BF}_3$ -счетчиков, с целью представления основных узлов детектора

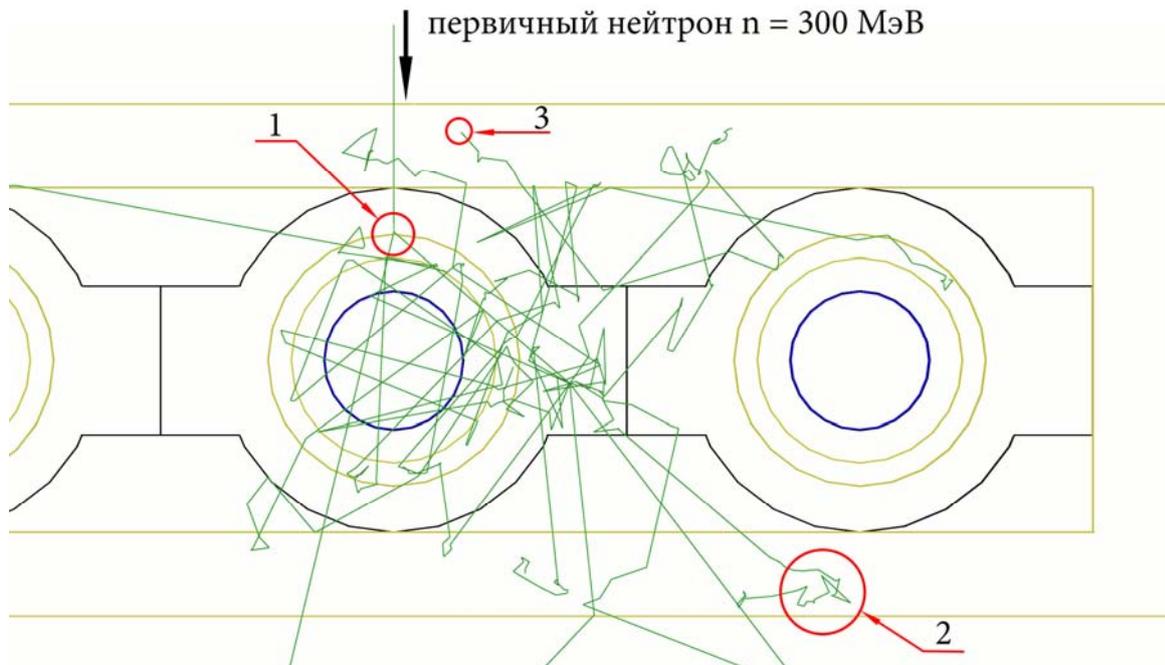


Рис. 3. Визуализация части фронтальной проекции модели одной секции стандартного НМ. Сверху на полиэтилен падает нейтрон с энергией 300 МэВ. В результате неупругого столкновения со свинцом (используется модель внутриядерных каскадов [Bertini, 1969; Heikkinen et al., 2003], точка «1») происходит размножение нейтронов. Хорошо видны процессы дрейфа нейтронов со множеством упругих столкновений (точка «2»), остановки и поглощения в полиэтилене (точка «3»). Все эти процессы рассчитываются с помощью пакета ENDF/B-VII.1 [Chadwick et al., 2011]. Захват нейтрона веществом счетчика здесь не иллюстрируется, но следует заметить, что он описывается стандартной реакцией $n+^{10}\text{B}\rightarrow^7\text{Li}+\alpha$ и моделируется также с использованием ENDF/B-VII.1

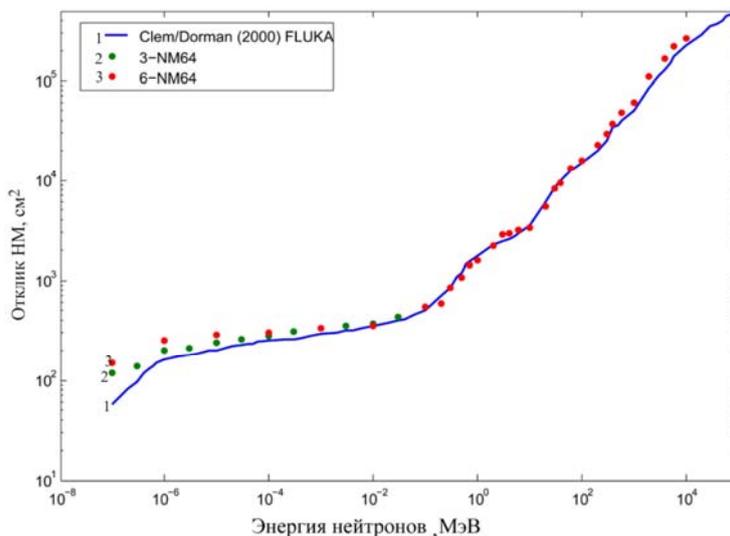


Рис. 4. Функция отклика НМ, полученная в результате моделирования прохождения потоков моноэнергичных нейтронов через систему детектора. Проводится сравнение с функцией, полученной ранее [Clem, Dorman, 2000] с помощью пакета FLUKA, видно хорошее совпадение. Различие в так называемом «хвосте» функции ($E=10^{-7}-10^{-2}$ МэВ) возникает, вероятно, из-за разных моделей взаимодействий нейтронов низких энергий, а также разных сечений взаимодействий

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ КЛ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Одной из самых сложных в программном комплексе RUSCOSMIC 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, задаются 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. На рис. 5 показан спектр протонов первичных КЛ, соответствующий периоду максимума солнечной активности в отсутствие СКЛ. Параметры каскадов вторичных КЛ, полученные в результате моделирования прохождения первичных частиц с такими энергетическими характеристиками через атмосферу Земли, представлены на рис. 6 и 7.

Классически высотные профили получают методом запуска шаров-зондов с установленными на них детекторами, чувствительными к заряженной компоненте. Суммарный счет можно выразить формулой

$$C_{\text{сумм}} = C_{e^+e^-} + C_{\mu^+\mu^-} + C_p + 0.01 \cdot C_\gamma, \quad (2)$$

где $C_{e^+e^-}$, $C_{\mu^+\mu^-}$, C_p , C_γ — число отсчетов электрон-позитронной, мюонной, протонной компонент и гамма-квантов соответственно.

Исходя из этого, суммируя полученные в результате моделирования высотные профили, можно провести сравнение с экспериментальными данными для отдельных времен. Пример такой верификации представлен на рис. 8.

Сумму среднестатистической погрешности и внутренней ошибки метода при моделировании высотных профилей удобно представить с помощью ширины линии, как это сделано на рис. 9.

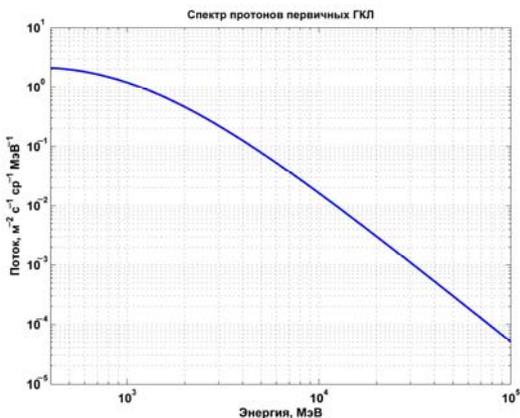


Рис. 5. Спектр протонов первичных ГКЛ от 400 МэВ до 10⁵ МэВ (жесткость геомагнитного обрезания ~1 ГВ) в отсутствие его модуляции СКЛ, используемый в качестве одной из характеристик модельного источника частиц при расчете потоков вторичных КЛ в атмосфере Земли

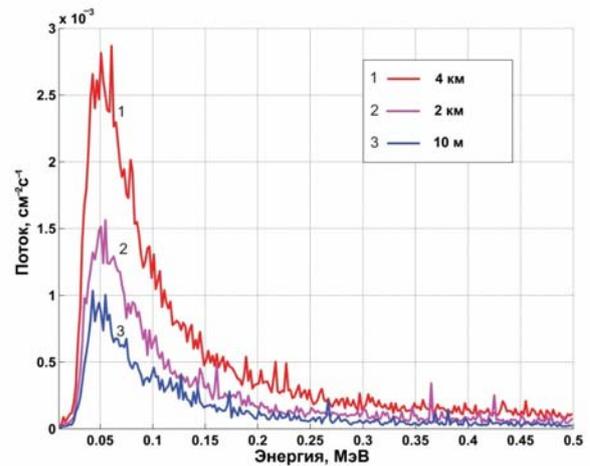
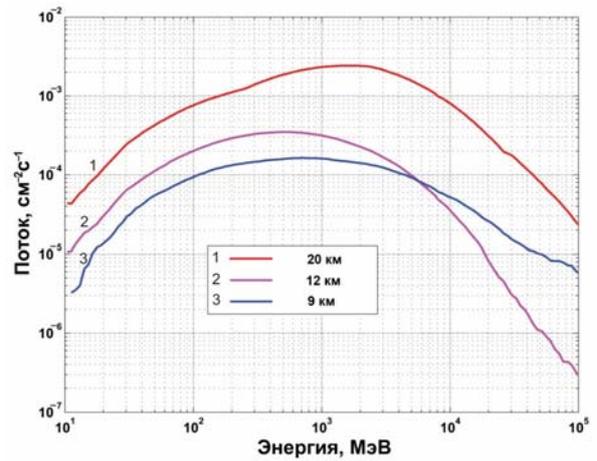


Рис. 6. Энергетические спектры протонов (вверху) и гамма-квантов (внизу) вторичных КЛ, полученные в результате моделирования прохождения частиц первичных КЛ со спектром, соответствующим периоду максимума солнечной активности, в отсутствие его модуляции СКЛ через атмосферу Земли

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был реализован широкий спектр задач — от простого моделирования стандартных детекторов, повсеместно используемых в экспериментах, до точных расчетов потоков вторичных КЛ, рождающихся в результате прохождения частиц первичных КЛ через атмосферу Земли. Получены функции отклика для устройств различной конфигурации, которые впоследствии были полезны при калибровке. Детальное исследование характеристик потоков вторичных КЛ является отдельной задачей и его описание выходит за рамки данной работы. Однако следует заметить, что отличительной чертой работы по расчету прохождения протонов первичных КЛ через атмосферу Земли является интеграция полученных в [Vashenyuk et al., 2011] спектров в модель, что позволяет быстро и точно получать энергетические характеристики и высотные профили как нейтронной, так и заряженной компонент (протоны, мюоны, электроны, позитроны) не только для простых ГКЛ, но и для различных моментов времени событий СКЛ. Эти результаты используются при расчете скорости ионизации атмосферы Земли для различных начальных условий. Кроме того, нами осуществлен переход от

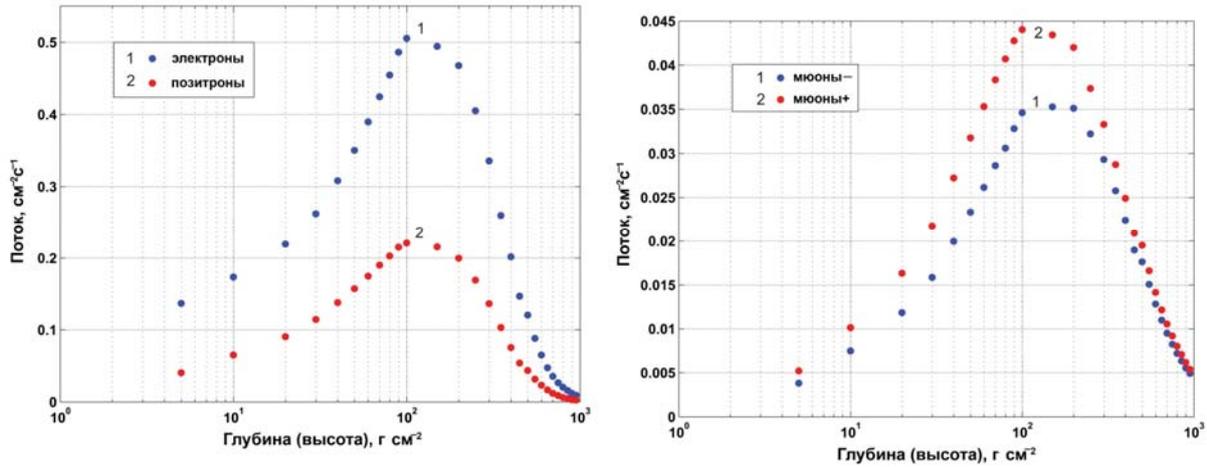


Рис. 7. Высотные профили электрон-позитронной (слева) и мюонной (справа) компонент вторичных КЛ, полученные в результате моделирования прохождения частиц первичных КЛ со спектром, соответствующим периоду максимума солнечной активности, в отсутствие его модуляции СКЛ через атмосферу Земли

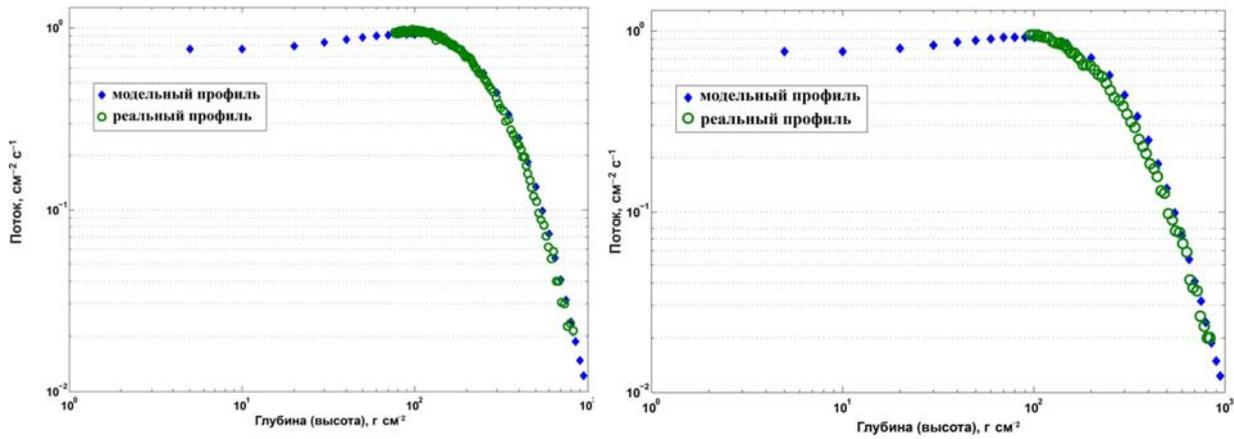


Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных (04.09.2009 (слева) и 21.12.2009 (справа)) и данных, полученных в результате моделирования прохождения частиц ГКЛ через атмосферу Земли и обработанных в соответствии с формулой (2)

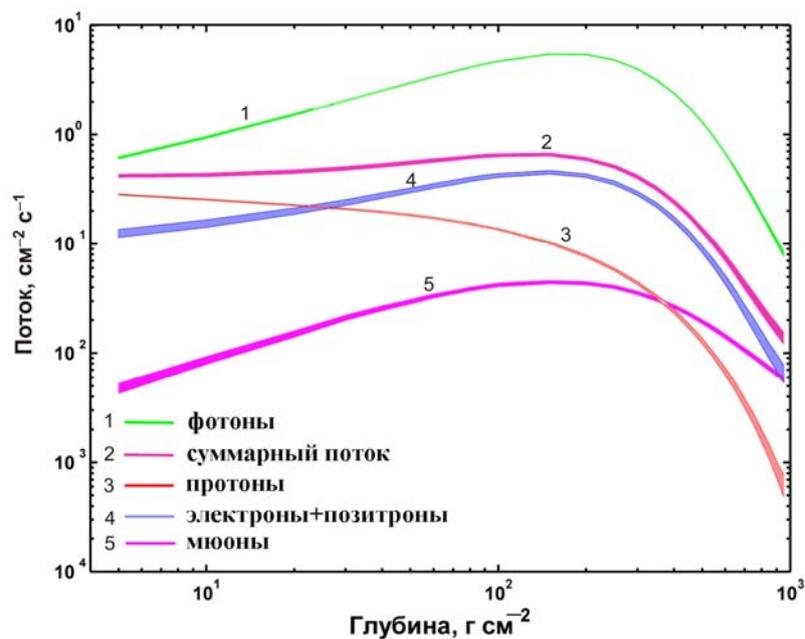


Рис. 9. Высотные профили потоков частиц, представленные с указанием интервала ошибки вычисления, полученные в результате моделирования прохождения ГКЛ через атмосферу Земли. Ширина линии означает суммарное отклонение от среднего и включает в себя как стандартную ошибку, так и внутреннюю ошибку метода

простой концепции плоской геометрии к более сложной глобальной модели, позволяющей использовать в моделировании всю информацию о первичном источнике частиц и получать карты ионизации для различных высот. Для полноценной реализации этой модели в нее включены соответствующим образом адаптированные методы повышения скорости вычислений, описание которых вместе с результатами моделирования в полном объеме будет приведено в последующих работах.

Огромным плюсом является тот факт, что результаты подлежат сравнению с экспериментальными данными, для чего существует огромная, накопленная годами информационная база. В заключение стоит заметить, что при первом сравнении уже получено хорошее согласие с небольшими, в районе ~10 % от среднего, отклонениями.

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*. 2003. V. 506, N 3. P. 250. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

Basilevskaya G.A., et al. Cosmic ray induced ion production in the atmosphere // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137. P. 149–173.

Bertini H.W. Intranuclear-cascade calculations of the secondary nucleon spectra from nucleon-nucleus interactions in the energy range 340 to 2900 MeV and comparison with experiment // *Phys. Rev.* 1969. V. 188. P. 1711–1730.

Chadwick M.B., Herman M., Obložinský P., et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for science and technology: Cross sections, covariances, fission product yields and decay data // *Nuclear Data Sheets*. 2011. V. 112, iss. 12. P. 2887–2996. DOI: 10.1016/j.nds.2011.11.002.

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

Heikkinen A., Stepanov N., Wellisch J.P. Bertini intranuclear cascade implementation in Geant4 // *Computing in High Energy and Nuclear Physics*. 24–28 March 2003, La Jolla, California. MOMT008.PDF.

Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V., Makhmutov V.S. Simulation of the transport of solar protons through the atmosphere in the 13 December 2006 GLE // *Physics of Auroral Phenomena: Proc. XXXIV Annual Seminar*. Apatity, 2011. P. 110–113.

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. 21st ECRS, Kosice, Slovakia, 9–12 September 2008*. Inst. of Exp. Phys Slovak Academy of Sci., 2009. P. 264–268.

Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Features of relativistic solar proton spectra derived from ground level enhancement events (GLE) modeling // *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. V. 7. P. 459–463.

REFERENCES

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*. 2003, vol. 506, no. 3, p. 250. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

Basilevskaya G.A., Usoskin I.G., Flückiger E.O., et al. Cosmic ray induced ion production in the atmosphere. *Space Sci. Rev.* 2008, vol. 137, pp. 149–173.

Bertini H.W. Intranuclear-cascade calculations of the secondary nucleon spectra from nucleon-nucleus interactions in the energy range 340 to 2900 MeV and comparison with experiment. *Phys. Rev.* 1969, vol. 188, pp. 1711–1730.

Chadwick M.B., Herman M., Obložinský P., et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for science and technology: Cross sections, covariances, fission product yields and decay data. *Nuclear Data Sheets*. 2011, vol. 112, iss. 12, pp. 2887–2996.

Clem J.M., Dorman L.I. Neutron monitor response function. *Space Sci. Rev.* 2000, vol. 93, pp. 335–359.

Heikkinen A., Stepanov N., Wellisch J.P. Bertini intranuclear cascade implementation in Geant4. *Computing in High Energy and Nuclear Physics*. 24–28 March 2003, La Jolla, California. MOMT008.PDF.

Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V., Makhmutov V.S. Simulation of the transport of solar protons through the atmosphere in the 13 December 2006 GLE. *Physics of Auroral Phenomena: Proc. XXXIV Annual Seminar*. Apatity, 2011. pp. 110–113.

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, vol. 107, no. 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, vol. 32, pp. 251–271.

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

Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Features of relativistic solar proton spectra derived from ground level enhancement events (GLE) modeling. *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011, vol. 7, pp. 459–463.