УДК 524.1

# РАСЧЕТ ПРОХОЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ ДЛЯ СОБЫТИЯ GLE № 69

© 2021 г. Е. А. Маурчев<sup>1, \*</sup>, Ю. В. Балабин<sup>1</sup>, А. В. Германенко<sup>1</sup>, Б. Б. Гвоздевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Полярный геофизический институт", Апатиты, Россия

\**E-mail: maurchev1987@gmail.com* Поступила в редакцию 25.02.2021 г. После доработки 12.03.2021 г. Принята к публикации 28.04.2021 г.

Представлен частный случай моделирования прохождения космических лучей через атмосферу Земли для события возрастания приземного фона, произошедшего 20 января 2005 г. Показаны высотные профили ионизации, полученные при расчетах прохождения солнечных протонов с энергетическими спектрами, соответствующими быстрой и медленной компоненте.

DOI: 10.31857/S0367676521080184

### введение

Событиями GLE (Ground level enhancement) называется явление возрастания скорости счета нейтронных мониторов, возникающее вследствие увеличения числа протонов (в основном с энергией до 10 ГэВ) в потоке первичных космических лучей (КЛ). Этому явлению, естественно, сопутствует увеличение скорости образования пар ионов на высотах от 0 до 80 км. Ранее в ПГИ была разработана методика, позволяющая получать энергетические спектры во время событий GLE методом решения обратной задачи с использованием данных сети станций нейтронных мониторов [1]. Полученные спектры применяются нами как входные параметры при моделировании программным комплексом RUSCOSMICS прохождения частиц через атмосферу Земли, в ходе которого получаются точные оценки скорости образования пар ионов, в частности в области высоких широт. В этой работе представлен такой результат, полученный для события, GLE № 69, которое произошло 20.01.2005. Проводится анализ полученных профилей скорости счета, принимая во внимание особенности, обусловленные характеристиками спектра первичных частиц.

Основными частицами, входящими в состав первичных солнечных космических лучей (СКЛ), являются протоны, их доля составляет до 90%. Оставшаяся часть состоит из электронов и ядер с зарядовым числом  $Z \ge 2$ . Вторгаясь в вещество атмосферы Земли эти частицы испытывают серии взаимодействий (в основном, с ядрами азота и кислорода), теряя свою энергию как на электромагнитные потери, так и на ядерные реакции, в

ходе которых рождаются целые каскады вторичных частиц (электроны, протоны, нейтроны, пионы, каоны, мюоны, гамма-кванты) [2].

Современный подход к исследованию частиц вторичных КЛ в атмосфере Земли включает в себя как экспериментальные методы [3], так и численное моделирование, например [4, 5]. В ПГИ был разработан специальный модуль RUSCOSMICS [6, 7], позволяющий детально изучать характеристики каскадов КЛ и получать их в виде количественных значений энергетических спектров, высотных кривых, а также вклада в скорость ионообразования. В этой работе представлен результат для частного случая, когда в качестве входных значений модели используется спектр СКЛ, соответствующий событию GLE № 69 для времени 7.00 UT и 8.00 UT.

#### МЕТОДИКА

Применяемый в работе модуль программного комплекса RUSCOSMICS для расчета прохождения частиц КЛ через атмосферу Земли разработан как самостоятельная модель, в основе которой лежат классы и методы пакета для разработки программ GEANT4 [8]. Такой подход позволяет использовать принцип наследования и реализовывать возможности создания геометрии, описания процессов взаимодействий, а также генерировать первичные частицы с заданными энергетическими характеристиками. Атмосфера Земли моделировалась в виде столба воздуха с распределением ее физических параметров по высоте (например, элементы в количестве 5% от общей массы в каждом слое), значения получаются при помощи эмпирической модели атмосферы Земли NRLMSISE-00 [9]. В совокупности с алгоритмами оптимизации это дает существенный вклад в уменьшение потребления расчетных мощностей и увеличение скорости вычислений до нескольких раз. В зависимости от заданной широты и долготы также вычисляется необходимое значение жесткости геомагнитного обрезания с использованием модели IGRF [10], конкретно для представленной работы эти параметры составляют 65.57 с.ш., 33.39 в.д. и  $R_{cutoff} = 0.65 \Gamma B$ .

Модельный источник первичных частиц реализуется при помощи специально разработанной нами программы, в которой есть код для чтения файлов данных и обработчик для создания необходимой функции плотности вероятности, соответствующей энергетическому спектру первичных КЛ. Как уже было сказано выше, модель атмосферы Земли задается в виде столба воздуха высотой 80 км. На верхней границе размещается генератор частиц, вектор скорости которых направлен перпендикулярно в нижнюю полусферу.

Прохождение через атмосферу и взаимодействие частиц с веществом реализуется при помощи набора моделей QGSP BERT HP (стандартные электромагнитные процессы, для адронов с энергией выше 10 ГэВ – кварк-глюонная струнная модель (QGS – Quark-Gluon String) [11], каскады Бертини для адронов с энергией ниже 10 ГэВ (BERT – Bertini cascades) [12], специальные наборы сечений для расчета взаимодействия нейтронов при низких энергиях 0.025 эВ-20 МэВ (НР -High Precision) [13]), который официально рекомендован разработчиками GEANT4 для решения задач астрофизики КЛ. Накопление и обработка информации о потоках вторичных КЛ в модели осуществляется на разных высотах, для этой работы – через каждый километр. Также нами реализован код, позволяющий производить вывод результата в виде гистограмм.

#### ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Были проведены расчеты для потока протонов ГКЛ, суммированных с потоком протонов СКЛ во время события GLE № 69. Энергия протона, который испускает источник первичных частиц, выбирается случайно в соответствии с заданным спектром. Для этого сам дифференциальный спектр, нормированный к единице, выступает в качестве нормализованной функции плотности вероятности и является основной характеристикой. Для случая, рассматриваемого в этой статье, используются данные, полученные при помощи методики, разработанной в ПГИ г. Апатиты [1].

На фазе роста профиля возрастания и в максимуме энергетический спектр СКЛ имеет экспо-



Рис. 1. Дифференциальные по энергии спектры протонов первичных КЛ, полученные по данным сети наземных станций НМ, используемые как входные параметры для расчета скорости ионообразования в атмосфере Земли во время события GLE № 69.  $1 - \Gamma$ КЛ,  $2 - \Gamma$ КЛ + СКЛ(РС),  $3 - \Gamma$ КЛ + СКЛ(DC). Время начала быстрой компоненты (РС) – 7.00 UT, медленной (DC) – 8.00 UT.

ненциальную форму, а питч-угловое распределение достаточно узкое, менее 90 град. На фазе спада энергетический спектр СКЛ становится степенным, а питч-угловое распределение уширяется вплоть до изотропии. Такое поведение СКЛ, как показывает обработка многих событий GLE, типично для СКЛ, так что эти две формы спектра были выделены в быструю (РС) и медленную (DC) компоненты соответственно [1]. Таким образом, в том случае, когда моделируется прохождение протонов СКЛ через атмосферу Земли, каждая компонента выражается через набор формул:

$$J_{PC} = J_0 \exp\left(-E/E_0\right) \\ J_{DC} = J_1 E^{-\gamma}$$
(1)

где для события GLE69  $J_0 = 1.5 \cdot 10^5$ ,  $E_0 = 0.72$ ,  $J_1 = 7.5 \cdot 10^4$ ,  $\gamma = 6.2$ , результирующие спектры представлены на рис. 1.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с использованием дифференциальных энергетических спектров, представленных на рис. 1, и высотных профилей скорости ионизации, представленных на рис. 2, в этой работе показано что для PC, быстрой компоненты СКЛ, характерно почти пропорциональное увеличение числа образования пар ионов относительно ГКЛ, лишь с небольшим смещением максимума профиля по высоте (максимальное увели-



Рис. 2. Высотные профили скорости ионизации атмосферы Земли частицами КЛ во время события GLE № 69 в случае моделирования прохождения через атмосферу Земли протонов с использованием спектра для медленной компоненты (треугольники), быстрой компоненты (крестики) и ГКЛ (кружки).

чение потока на высоте 10—15 км на два порядка). Для DC ситуация другая, поскольку большое количество не испытывающих ядерные взаимодействия первичных частиц с низкой энергией вызывает пропорциональный рост ионизации со смещением максимума вверх (увеличение потока на четыре порядка со смещением максимума на высоту 20–25 км).

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 18-77-10018).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. et al. // Astrophys. Space Sci. Trans. 2011. V. 7. No. 4. P. 459.
- Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 462 с.
- 3. Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al. // Adv. Space Res. 2009. V. 44. No. 10. P. 1124.
- Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Mironova I.A. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. No. D10302.

- Velinov P.I.Y., Balabin Yu.V., Maurchev E.A. // Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci. 2017. V. 70. No. 4. P. 545.
- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 711; Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Gvozdevskii B.B., Vashenyuk E.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 657.
- 7. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. // Солн.-земн. физ. 2016. Т. 2. № 4. С. 3; Maurchev Е.А., Balabin Yu.V. // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2. No. 4. Р. 3.
- Agostinelli S., Allisonas J., Amako K. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2003. V. 506. P. 250.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P. et al. // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. No. A12. P. 1468.
- 10. *Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al.* // Earth Planet Sp. 2015. V. 67. No. 79. P. 1.
- 11. Amelin N.S., Gudima K.K., Toneev V.D. et al. // Sov. J. Nucl. Phys. 1990. V. 51. P. 327.
- 12. Heikkinen A., Stepanov N., Wellish J.P. et al. // arXiv: nucl-th/0306008. 2003.
- Garny S., Leuthold G., Mares V., Paretzke H.G., Ruhm W. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2009. V. 56. No. 4. P. 2392.

# Calculation of solar cosmic rays propagation through the Earth's atmosphere for the GLE no. 69 event

## E. A. Maurchev<sup>a, \*</sup>, Yu. V. Balabin<sup>a</sup>, A. V. Germanenko<sup>a</sup>, B. B. Gvozdevskiy<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia \*e-mail: maurchev1987@gmail.com

We study a special case of modeling the cosmic ray's passage through the Earth's atmosphere for the event of the ground level enhancement that occurred on January 20, 2005. The ionization profiles obtained from calculation are shown for different components of the secondary cosmic rays, such as electrons, positrons. muons, protons.