

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.140-142

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПРОТОНАМИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ШИРОТ ВО ВРЕМЯ СОБЫТИЯ GLE NO 61 И ОЦЕНКА ВКЛАДА В ЭТОТ ПРОЦЕСС ЯДЕР КИСЛОРОДА В СЛУЧАЕ СПЕКТРА ЧИСТО ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин

ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия

Аннотация. 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 $Z \geq 2$. Взаимодействуя с веществом 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, каоны, мюоны, гамма-кванты). Современный подход к исследованию частиц вторичных КЛ в атмосфере Земли включает в себя как экспериментальные методы, так и численное моделирование. В ПГИ был разработан специальный модуль программного комплекса RUSCOSMICS, позволяющий детально изучать характеристики каскадов КЛ и получать их в виде количественных значений энергетических спектров, высотных кривых, а также вклада в скорость ионообразования. В данной работе представлены результаты для частного случая, когда в качестве входных значений модели используются спектры СКЛ, соответствующие событию GLE No 61. Наряду с этим представлены аналогичные данные, полученные в результате прохождения через атмосферу Земли ядер кислорода первичных галактических КЛ.

Введение

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 $Z \geq 2$. 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, каоны, мюоны, гамма-кванты)[1].

Современный подход к исследованию частиц вторичных КЛ в атмосфере Земли включает в себя как экспериментальные методы [2], так и численное моделирование, например [3,4]. В ПГИ был разработан специальный модуль RUSCOSMICS [5,6], позволяющий детально изучать характеристики каскадов КЛ и получать их в виде количественных значений энергетических спектров, высотных кривых, а также вклада в скорость ионообразования. В данной работе представлены результаты для частного случая, когда в качестве входных значений модели используются спектры СКЛ, соответствующие событию GLE No 61.

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 GEANT4 [7]. 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 NRLMSISE-00 [8]. В совокупности с алгоритмами оптимизации это дает существенный вклад в уменьшение потребления расчетных мощностей и увеличения скорости вычислений до нескольких раз. В зависимости от заданной широты и долготы также вычисляется необходимое значение жесткости геомагнитного обреза с использованием модели IGRF [9], конкретно для представленной работы эти параметры составляют 65.57 N, 33.39 E и $R_{cutoff} = 0.65$ GV.

Источник первичных частиц реализуется при помощи класса, в который встроены парсер для чтения файлов данных и обработчик для создания необходимой функции плотности вероятности, соответствующей энергетическому спектру первичных КЛ. Высота расположения составляет 80 км, а вектор скорости потока направлен перпендикулярно верхней плоскости столба воздуха. Такое упрощение было допущено вследствие

множества опытных реализаций, которые показали, что учет углового распределения не влияет на конечный результат, сильно уменьшая при этом статистическую точность.

Моделирование взаимодействия частиц с веществом реализуется при помощи класса физических процессов (стандартный лист) QGSP_BERT_HP, который официально рекомендован разработчиками GEANT4 для решения задач астрофизики КЛ. Накопление и обработка информации о потоках вторичных КЛ производится методами детектирующих объемов, расположенных на заданных высотах. Также в них реализован код, позволяющий производить вывод результата в виде гистограмм.

Входные данные для моделирования

В представленной работе проведены расчеты для протонов КЛ, модулированных СКЛ во время события GLE No 61. Основной характеристикой источника первичных частиц, реализованного в модели, является плотность вероятности, выводимая методом нормировки дифференциального энергетического спектра протонов КЛ. Для случая, рассматриваемого в этой статье, используются данные, полученные при помощи уникальной методики, разработанной в ПГИ г. Апатиты [9]. Согласно теории, представленной в работе авторов, спектр протонов первичных СКЛ состоит из двух компонент, быстрой и медленной, для каждой из которых дается соответствующее выражение: $J_{PC} = J_0 \cdot \exp(-E/E_0)$ и $J_{DC} = J_1 \cdot E^{-\gamma}$, где J_0 , E_0 , J_1 , γ – коэффициенты, отличающиеся в зависимости от номера события GLE. Соответствующие параметры приведены в таблице, результирующие спектры представлены на рис. 1а.

При моделировании прохождения протонов галактических КЛ (ГКЛ) и ядер кислорода через атмосферу Земли использовались спектры, взятые из соответствующих ГОСТов. Их графики приведены на рис. 2, а. Следует заметить, что для учета реальной формы спектра учитывались значения жесткостей геомагнитного обрезания, в то время как на иллюстрации диапазон энергий начинается с 10 МэВ.

Таблица. Параметры дифференциальных энергетических спектров протонов СКЛ для событий GLE No 61, полученные в работе [9] и используемые как входные параметры при создании функции плотности вероятности генератора первичных частиц модуля RUSCOSMICS.

GLE	Дата	Коэффициенты			
		J_0	E_0	J_1	γ
61	18.04.2001	$2.5 \cdot 10^4$	0.52	$1.2 \cdot 10^3$	3.6

Результаты расчетов

В результате моделирования прохождения протонов СКЛ через атмосферу Земли, их взаимодействия с окружающим веществом и последующего развития каскадов были получены соответствующие кривые скорости ионизации в зависимости от высоты для географических координат 65.57 N, 33.39 E и значения жесткости геомагнитного обрезания $R_{cutoff} = 0.65$ GV. Результирующий график для события GLE No 61 представлен на рис. 1б. Аналогичные данные для чистых ГКЛ и с учетом моделирования прохождения ядер кислорода через атмосферу Земли приведены на рис. 2б.

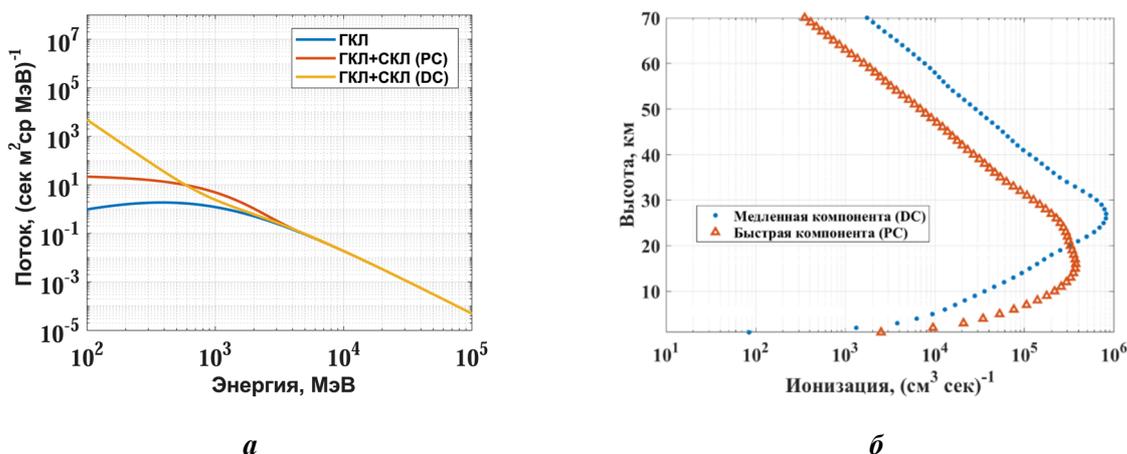


Рисунок 1. Дифференциальные энергетические спектры протонов первичных СКЛ (а), полученные по данным сети наземных станций НМ, используемые как входные параметры для расчета скорости ионообразования в атмосфере Земли во время события GLE No 61. Высотные профили скорости ионизации атмосферы Земли (б) частицами КЛ во время события GLE No 61 в случае медленной и быстрой компонент, полученные путем моделирования процессов при помощи программного комплекса RUSCOSMICS.

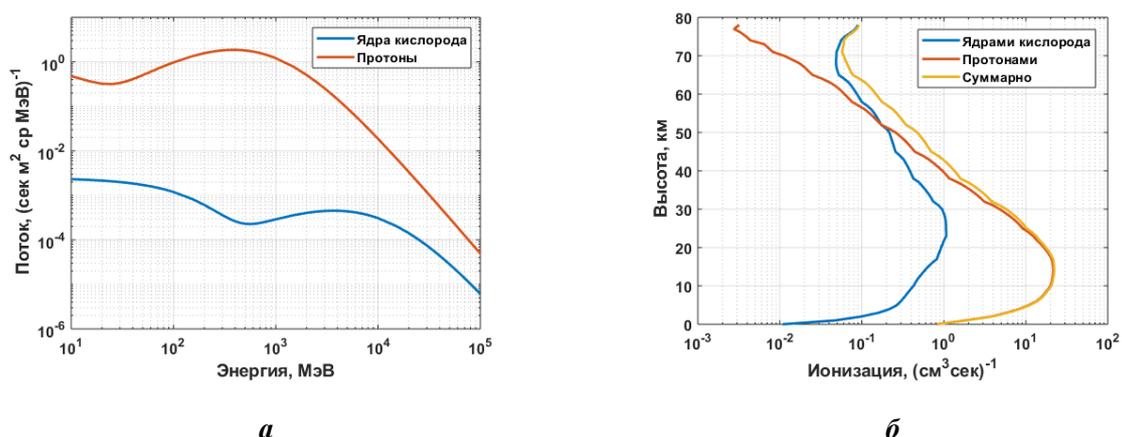


Рисунок 2. Дифференциальные энергетические спектры протонов и ядер кислорода первичных ГКЛ (*а*), используемые как входные параметры при расчетах оценки вклада в скорость ионизации частиц с зарядовым числом $Z > 2$. Высотные профили скорости ионизации атмосферы Земли (*б*) протонами и ядрами кислорода ГКЛ, полученные путем моделирования процессов при помощи программного комплекса RUSCOSMICS.

Заключение

В представленной работе получены результаты, позволяющие сделать как количественные, так и качественные оценки влияния протонов СКЛ во время события GLE No 61 и ядер азота ГКЛ на скорость ионообразования в зависимости от высоты. Такие данные являются полезными не только при детальном исследовании КЛ в решении фундаментальных задач, но и в прикладных областях, таких как оценка радиационной безопасности в области высоких широт.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 18-77-10018.

Литература

1. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. «Наука». Москва, 1975.
2. Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., et al. // Adv. in Space Res. 2009. V. 44. Is. 10. P. 1124-1137.
3. Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Mironova I.A. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D10302.
4. Velinov P. I.Y., Balabin Yu. V., Maurchev E. A. // Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci. 2017. V. 70. Is. 4. P. 545-555.
5. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. и др. // Известия РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 711 [Maurchev E. A., Balabin Yu. V., Gvozdevskii B. B., et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. Is. 5. P. 657-659.]
6. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2. № 4. С. 3-8 [Maurchev E.A., Balabin Yu.V. // Solar-Terrestrial Physics. 2016. V. 2. Is. 4. P. 3-10.]
7. Agostinelli S., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2003. V. 506. Sect. A. P. 250.
8. Picone J. M. et al. // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. A. 12. P. 1468.
9. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. // Astrophysics and Space Sciences Transactions. 2011. V. 7. Is. 4. P. 459-463.