УДК 524.1-65

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ ДЛЯ СОБЫТИЙ GLE42 И GLE44

© 2021 г. Е. А. Маурчев^{1, *}, Ю. В. Балабин¹, А. В. Германенко¹, Б. Б. Гвоздевский¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия *E-mail: maurchev 1987@gmail.com Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г. Принята к публикации 27.11.2020 г.

Представлены результаты численного моделирования для двух независимых событий GLE, произошедших в различное время и имеющих отличающиеся энергетические характеристики протонов в первичных частицах. Выполнен анализ полученных зависимостей с учетом особенностей обусловленных характеристиками каждого спектра.

DOI: 10.31857/S0367676521030170

введение

Событие GLE (Ground level enhancement) представляет собой возрастание скорости счета нейтронных мониторов, вызванное увеличением числа протонов (в основном с энергией до 10 ГэВ) в потоке первичных космических лучей (КЛ). Это явление, соответственно, сопровождается увеличением скорости образования пар ионов на высотах от 0 до 80 км. В Полярном геофизическом институте г. Апатиты (ПГИ) разработана методика, позволяющая получать энергетические спектры протонов первичных КЛ во время событий GLE методом решения обратной задачи с использованием данных сети станций нейтронных мониторов (НМ). Полученные спектры применяются нами как входные параметры при моделировании программным комплексом RUSCOSMICS [6, 7] прохожления частиц через атмосферу Земли. в результате которого получаются оценки скорости образования пар ионов, в частности в области высоких широт.

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 реакций (в основном, с ядрами азота и кислорода), теряя свою энергию как через электромагнитные, так и через ядерные взаимодействия, в ходе которых рождаются каскады вторичных частиц (элек-

троны, протоны, нейтроны, каоны, мюоны, гамма-кванты) [1].

Современный подход к исследованию частиц вторичных КЛ в атмосфере Земли включает в себя как экспериментальные методы [2, 3], так и численное моделирование, например [4, 5]. В ПГИ был разработан специальный программный 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 данной работе представлены результаты для частного случая, когда в качестве входных значений модели используются спектры СКЛ, соответствующие событию GLE № 42 и GLE № 44.

МЕТОДИКА

Для решения задачи оценки влияния СКЛ на скорость образования ионов в нижней атмосфере Земли использовался модуль программного комплекса RUSCOSMICS, реализованный нами при помощи пакета для разработки программ GEANT4 [8, 9]. Выбор в пользу такого подхода обусловлен удобством при создании собственного исходного кода для описания геометрии, процессов взаимодействия и генерации первичных частиц с заданными энергетическими характеристиками. Для этой работы рассматривался участок атмосферы Земли с географическими координатами 67.57° с.ш., 33.39° в.д. (г. Апатиты), который моделировался в виде столба воздуха высотой 80 км,

GLE	Дата	Коэффициенты			
		J_0	E_0	J_1	γ
42	29.09.1989	$1.5 \cdot 10^4$	1.74	$2.5 \cdot 10^4$	4.1
44	22.10.1989	$7.5 \cdot 10^{4}$	0.91	$1.5 \cdot 10^{4}$	6.1

Таблица 1. Параметры дифференциальных энергетических спектров протонов СКЛ для событий GLE № 42 и GLE № 44

разделенным на 20 слоев, в каждом из которых находится 5% вещества от общей массы. Установка такого показателя позволяет достигнуть оптимального соотношения между скоростью вычислений и качеством результатов. Значения температуры, плотности и состава получаются при помощи NRLMSISE-00 [10], при этом учитывается сезонное влияние. В совокупности с алгоритмами оптимизации это дает существенный вклад в уменьшение потребления расчетных мощностей и увеличения скорости вычислений.

В модели источник первичных частиц реализуется при помощи соответствующей программы, включающей в себя блок для чтения файлов данных и обработчик для создания необходимой функции плотности вероятности, соответствуюшей энергетическому спектру первичных КЛ. Расположение соответствует верхней точке границы атмосферы (80 км), а вектор скорости потока направлен перпендикулярно верхней плоскости столба воздуха. При учете углового распределения частиц в начальном потоке положение максимума высотного профиля скорости ионизации сохраняется, поэтому такое упрощение было использовано для ускорения набора статистики. Слелует заметить, что использовать такую оптимизацию можно лишь в случае оценки скорости ионизации, а при решении таких задач как, например, вычисление угловых распределений вторичных частиц это недопустимо. Также, в зависимости от заданной широты и долготы, вычисляется необходимое значение жесткости геомагнитного обрезания с использованием модели IGRF [11], конкретно для представленной работы этот параметр равен $R_{cutoff} = 0.65 \ \Gamma B.$

Для расчета взаимодействий частиц используется список моделей, включающий в себя стандартные электромагнитные процессы, каскады Бертини для энергий ниже 9.9 ГэВ [12], выше 10 ГэВ – кварк-глюонную струнную модель [13]. специальные наборы сечений для расчета взаимодействия нейтронов при низких энергиях 0.025 эВ-20 МэВ [14]. Для последующей обработки информации о потоках вторичных КЛ нами был написан программный код, реализующий накопление данных и интегрированный как метод детектирующих объемов, расположенных на заданных высотах. Вывод результата производится в виде гистограмм.

СПЕКТРЫ ПЕРВИЧНЫХ ЧАСТИЦ

В представленной работе проведены расчеты для протонов КЛ, модулированных СКЛ во время события GLE 42 и 44. 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 методики, разработанной в ПГИ [15]. Согласно ей, из спектра протонов первичных СКЛ можно выделить две компоненты, быструю (PC) и медленную (DC), для каждой из которых дается соответствующее выражение, которые можно представить через формулу (1) и (2):

$$J_{PC} = J_0 \exp^{(-E/E_0)},$$
 (1)

$$J_{DC} = J_1 E^{-\gamma},\tag{2}$$

где J_0, E_0, J_1, γ – коэффициенты, отличающиеся в зависимости от номера события GLE. Соответствующие параметры приведены в табл. 1, графическое представление результирующих спектров показано на рис. 1. Из рис. 1 видно, что для РС – быстрой компоненты – характерно появление частиц с энергией выше 1 ГэВ с почти равной вероятностью, как и ниже 1 ГэВ. В DC – медленной компоненте – ситуация совершенно другая, в спектре наблюдаются потоки, на несколько порядков превосходящие в энергии ниже 1 ГэВ те, которые выше 1 ГэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

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° с.ш., 33.39° в.д. и значения жесткости геомагнитного обрезания $R_{cutoff} = 0.65 \ \Gamma B$. Выявлены положения максимума профиля ионизации высокоширотной атмосферы в зависимости от формы спектра первичных протонов солнечных космических лучей.

Из рис. 2. на котором представлены высотные профили скорости ионизации для двух независимых событий GLE, видно, что для PC форма высотного профиля практически совпадает с профилем, полученным для ГКЛ, с лишь небольшим смещением максимума по высоте. По абсолютной величине скорости ионизации для РС выше на два порядка на высоте 10-15 км, чем для ГКЛ.





Рис. 1. Дифференциальные энергетические спектры протонов первичных СКЛ, полученные по данным сети наземных станций HM, используемые как входные параметры для расчета скорости образования пар ионов в атмосфере Земли во время события GLE № 42 (а) и GLE № 44 (б). $1 - \Gamma KЛ$, 2 -быстрая компонента СКЛ, 3 -медленная компонента СКЛ.



Рис. 2. Высотные профили скорости ионизации атмосферы Земли частицами КЛ во время события GLE № 42 (а) и GLE № 44 (б) в случае медленной и быстрой компонент. Данные получены путем моделирования процессов при помощи программного комплекса RUSCOSMICS. *1* – Медленная компонента СКЛ, *2* – быстрая компонента СКЛ, *3* – ГКЛ.

Для DC ситуация другая: огромное количество не испытывающих ядерные взаимодействия первичных частиц с низкой энергией вызывает пропорционально большой рост ионизации на больших высотах, поэтому максимум профиля расположен выше, чем у профиля для ГКЛ, на высоте 20–25 км. По величине ионизация от DC выше на четыре порядка, чем для ГКС.

ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все представленные в этой работе результаты получены при помощи моделирования с исполь-

зованием численных моделей. При таком подходе необходимо иметь обязательную методику верификации, основанную на применении экспериментальных данных. В наших более ранних работах можно найти подробное описание ее реализации и примеры сравнений [16].

Самым эффективным методом является использование шаров-зондов [1, 2], на которых установлены детектор заряженной компоненты, электронная часть и батарея питания. Во время полета устройство собирает и передает информацию о скорости счета на приемную станцию в режиме реального времени.

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 85 № 3 2021



Рис. 3. На рисунке представлено сравнение результатов, полученных в ходе моделирования прохождения протонов солнечных КЛ во время события GLE № 65 через атмосферу Земли, с данными полета шаровзондов. 1 - Баллонные измерения, 2 - модельные данные (медленная компонента), <math>3 - модельные данные (быстрая компонента).

Как уже говорилось выше, в нашей модели реализованы детектирующие объемы, позволяющие в буквальном смысле воспроизводить эксперимент по запуску шаров-зондов. Таким образом, моделируется прохождение протонов частиц через атмосферу Земли с использованием энергетического спектра и параметризации геометрии в соответствии с выбранным промежутком времени, при этом на заданных уровнях высоты (или глубины) выполняется накопление массива данных скорости счета, которую можно выразить при помощи формулы (3):

$$CR_{\rm obilit} = CR_p + CR_{e^-e^+} + CR_{\mu^-\mu^+} + 0.01CR_{\gamma}, \qquad (3)$$

где CR_p – скорость счета протонов, CR_{ee}^{-+} – элек-

тронов и позитронов, $CR_{\mu\mu}^{-+}$ — мюонов и CR_{γ} — гамма-квантов. Таким образом, сопоставляя полученные модельные результаты и ряды экспериментальных данных, можно оценивать корректность проведенного моделирования.

Следует заметить, что основными ценностями в эксперименте по запуску шаров-зондов для нас являются очень продолжительный непрерывный характер исследования и большая высота достигаемых высот. Однако помимо этого в решении задач по моделированию глобальной модели атмосферы Земли также важны данные о скорости счета, которые распределены в относительно большом диапазоне географической широты и долготы. Поэтому нами также используются собственные наземные и компактные детекторы излучения, разработанные специально с этой целью, пример профилей, сделанных во время полета на самолете можно посмотреть на сайте проекта [17]. Конечная обработка полученных данных для сравнения результатов производится аналогично той, что была описана для шаров-зондов. Пример верификации, полученный в более ранних работах [16], приведен на рис. 3. В качестве особенности можно выделить расхождение значений после ~22 км, объяснение его происхождения остается открытым вопросом. Также видно, что от высот ~25 км профили DC и PC компонент почти одинаковы, вследствие одинаковых значений спектров первичных протонов для энергий выше 10 ГэВ. Связано это также и с тем, что при рассмотрении воздействия КЛ на область атмосферы ниже 30 км допустимо устанавливать нижний порог энергии первичных частиц 1 ГэВ. При этом нужно понимать, что это делается только для проведения верификации, расчет ионизации вещества частицами СКЛ производится с соответствующим значением невертикальной жесткости геомагнитного обрезания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенного выше анализа спектрального состава и высотных профилей скорости ионизации для двух независимых событий GLE, видно, что для быстрой компоненты (РС) форма высотного профиля практически совпадает с профилем для ГКЛ, с лишь небольшим смещением максимума профиля по высоте. По абсолютной величине скорости ионизации для быстрой компоненты выше на два порядка на высоте 10-15 км, чем для ГКЛ. Для медленной компоненты (DC) ситуация другая: огромное количество не испытывающих ядерные взаимодействия первичных частиц с низкой энергией вызывает пропорционально большой рост ионизации на больших высотах, поэтому максимум профиля расположен выше, чем у профиля для ГКЛ, на высоте 20-25 км. По величине ионизация от DC выше на четыре порядка, чем для ГКС.

Все результаты моделирований в полном объеме публикуются на официальном сайте проекта [17].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 426 с.
- 2. Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya, G.A. et al. // Adv. Space Res. 2009. V. 44. No. 10. P. 1124.
- Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Y.I. et al. // J. Atm. Sol. Terr. Phys. 2016. V. 149. P. 258.

- 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. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 712; Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Gvozdevskii B.B. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 657.
- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. // Солн.-земн. физ. 2016. Т. 2. № 4. С. 3; Maurchev E.A., Balabin Yu.V. // Sol.-Terr. Phys. 2016. V. 2. No. 4. Р. 3.
- Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2003. V. 506. P. 250.
- Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 186.

- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. No. A12. P. 1468.
- 11. *Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al.* // Earth Planet Sp. 2015. V. 67. Art No. 112.
- 12. Heikkinen A., Stepanov N., Wellish J.P. et al. // arXiv: nucl-th/0306008. 2003.
- 13. Amelin N.S., Gudima K.K., Toneev V.D. et al. // Sov. J. Nucl. Phys. 1990. V. 51. P. 327.
- 14. *Garny S., Leuthold G., Mares V. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2009. V. 56. No. 4. P. 2392.
- 15. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. et al. // ASTRA. 2011. V. 7. No. 4. P. 459.
- Маурчев Е.А., Германенко А.В., Михалко Е.А. и др. Фундаментальные и прикладные космические исследования: Сб. науч. тр. М.: ИКИ, 2019. С. 103.
- 17. www.ruscosmics.ru.

The modeling of the solar cosmic rays proton fluxes transport through the Earth atmosphere for the GLE42 and GLE44 events

E. A. Maurchev^{a, *}, Yu. V. Balabin^a, A. V. Germanenko^a, B. B. Gvozdevsky^a

^aPolar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia *e-mail: maurchev1987@gmail.com

We present the results obtained by the numerical simulation for two independent GLE events that occurred at different times and have different energy characteristics of protons in primary particles. The analysis of the obtained dependencies is carried out, taking into account the features due to the characteristics of each spectrum.