

УДК 537.591.5

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС RUSCOSMICS КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПРОТОНАМИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2019 г. Е. А. Маурчев^{1, *}, Е. А. Михалко¹, А. В. Германенко¹,
Ю. В. Балабин¹, Б. В. Гвоздевский¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Полярный геофизический институт”, Апатиты, Россия

*E-mail: maurchev1987@gmail.com

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

В работе представлен обзор возможностей использования модуля программного комплекса RUSCOSMICS, предназначенного для расчета прохождения частиц космических лучей (КЛ) через атмосферу Земли. Рассматривается общая информация о современных методах исследований потоков вторичных КЛ, приводятся ссылки на работы других групп. Также описываются ключевые моменты, используемые в методике проведения расчетов, рассматриваются особенности параметризации начальных условий. Приводятся типовые результаты, полученные в ходе моделирования. В заключении подведены итоги текущей работы, а также уделено внимание перспективам проекта.

DOI: 10.1134/S0367676519050247

ВВЕДЕНИЕ

Первичные КЛ состоят из электронов, ядер с атомным номером $Z \geq 2$ и протонов, причем доля последних составляет ок. 85–90%. Проходя через атмосферу Земли, эти частицы активно взаимодействуют с ее веществом, при этом в результате реакции неупругих соударений ядерно-активной компоненты преимущественно с ядрами азота и кислорода рождаются каскады вторичных КЛ [1, 2]. Обобщенную формулу канала реакции тогда можно представить в виде соответствующего выражения:

$$\text{nuclon} + \text{air} \rightarrow p + n + \pi^+ + \pi^0 + k^+ + k^0. \quad (1)$$

Заряженные частицы первичных и вторичных КЛ также теряют свою энергию на ионизацию окружающего их вещества, а также на радиационные потери:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial x} \right)_{\text{иониз.}e^-} = \frac{2\pi}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \times \left(\ln \frac{m_e c^2 E}{\bar{I}^2} \frac{\beta^2}{2(\beta)} - (2\sqrt{\beta} - 1 + \beta^2) \ln 2 + \bar{\beta} + \frac{1}{8} (1 - \sqrt{\beta})^2 \right), \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial E}{\partial x} \right)_{\text{иониз.}z.ч.} = \frac{4\pi Z^2}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \times \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{\bar{I}} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right], \quad (3)$$

где $m_e c^2$ – масса покоя электрона (511 кэВ), $\beta = v/c$, $\bar{\beta} = 1 - \beta^2$, Z – заряд ядер веществ в единицах заряда позитрона, $\bar{I} = 13.5 \text{ эВ} \cdot Z$ – средний потенциал ионизации атомов среды, n_e – плотность электронов в среде, r_0 – классический электронный радиус, L_r – радиационная длина пробега. Формула 2 справедлива для электронов, а формула 3 – для протонов и других заряженных частиц.

Исследование частиц вторичных КЛ в атмосфере Земли сегодня проводится как экспериментальными методами [3], так и при помощи численных моделей, например [4, 5]. В ПГИ разработан соответствующий модуль RUSCOSMICS [6, 7], позволяющий исследовать особенности развития каскадов в зависимости от состояния источника первичных частиц, а также получать количественные характеристики в виде энергетических спектров, высотных профилей и скорости ионизации вещества. В представленной работе приводится ряд полученных результатов как для галактических КЛ (ГКЛ), так и для солнечных КЛ (СКЛ).

1. МЕТОДИКА

Используемый модуль программного комплекса RUSCOSMICS является полностью самостоятельной моделью, основанной на инструментари GEANT4 [8] и, соответственно, наследует

Таблица 1. Параметры дифференциальных энергетических спектров протонов СКЛ для событий GLE69 и GLE70, полученные в работе [12] и используемые как входные параметры генератора первичных частиц соответствующего модуля RUSCOSMICS

GLE	Дата	Коэффициенты			
		J_0	E_0	J_1	γ
69	20.01.2005	$2.5 \cdot 10^6$	0.49	$7.2 \cdot 10^4$	5.6
70	13.12.2006	$3.5 \cdot 10^4$	0.59	$4.3 \cdot 10^4$	5.7

все его возможности по реализации геометрии, физических процессов и параметризации первичного генератора частиц. Атмосфера Земли может использоваться как в виде столба для некоторого локализованного участка (“плоская” геометрия), так и в глобальном масштабе. При этом в любом случае используется параметризация при помощи NRLMSISE-00 [9] совместно с алгоритмами оптимизации, заключающимися в создании слоев с заданным процентным содержанием вещества. Для глобальной модели также применяется вычисление значений жесткостей геомагнитного обрезания для необходимых точек посредством модели IGRF [10].

Модельный источник первичных КЛ располагается на высоте 80 км и генерирует поток частиц, имеющих направление, перпендикулярное верхней плоскости столба атмосферы, и равномерное случайное распределение по ней. Опытным путем было получено, что учет углового распределения не изменяет конечного результата вследствие нормировки на поток первичных частиц, а лишь уменьшает статистическую точность.

Для расчета взаимодействия частиц с веществом использовался стандартный лист физических процессов QGSP_BERT_HP, рекомендованный разработчиками GEANT4 для решения задач астрофизики КЛ. Сбор необходимой информации производится через детектирующие объемы, расположенные на заданных высотах, в конце каждого события данные записываются в соответствующие гистограммы.

2. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ИСТОЧНИКА ЧАСТИЦ

В представленной работе были проведены расчеты как для спектра ГКЛ (минимум солнечной

активности), так и для СКЛ во время событий GLE69 и GLE70. Основной параметр модельного источника — плотность вероятности генерируемых частиц — получается путем нормировки соответствующего дифференциального энергетического спектра. Если для ГКЛ эти данные вычисляются при помощи действующего ГОСТ 25645.150-90, то в случае СКЛ используется уникальная методика, разработанная в ПГИ г. Апатиты [11–14], согласно которой в спектре присутствуют две компоненты — быстрая (PC) и медленная (DC), которые могут быть выражены через формулы:

$$J_{PC} = J_0 \exp(-E/E_0), \quad (4)$$

$$J_{DC} = J_1 E^{-\gamma}, \quad (5)$$

где J_0 , E_0 , J_1 , γ — коэффициенты, различающиеся в зависимости от номера события GLE. Таким образом, для возрастаний с номерами 69 и 70 были использованы параметры, приведенные в табл. 1.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В результате моделирования взаимодействия протонов первичных КЛ с веществом атмосферы Земли, последующего развития каскадов и прохождения частиц вторичных КЛ были получены высотные профили скорости ионизации. Типовые графики, на которых отображен результат как для ГКЛ, так и для СКЛ в случае разных значений жесткости геомагнитного обрезания, представлены на рис. 1. Также для ГКЛ в период минимума солнечной активности была рассчитана скорость ионизации для глобальной модели атмосферы с шагом сетки 5° и для высот от 0 до 80 км с шагом в 1 км. Характерные графики для высот 12 и 5 км, позволяющие оценить показатель

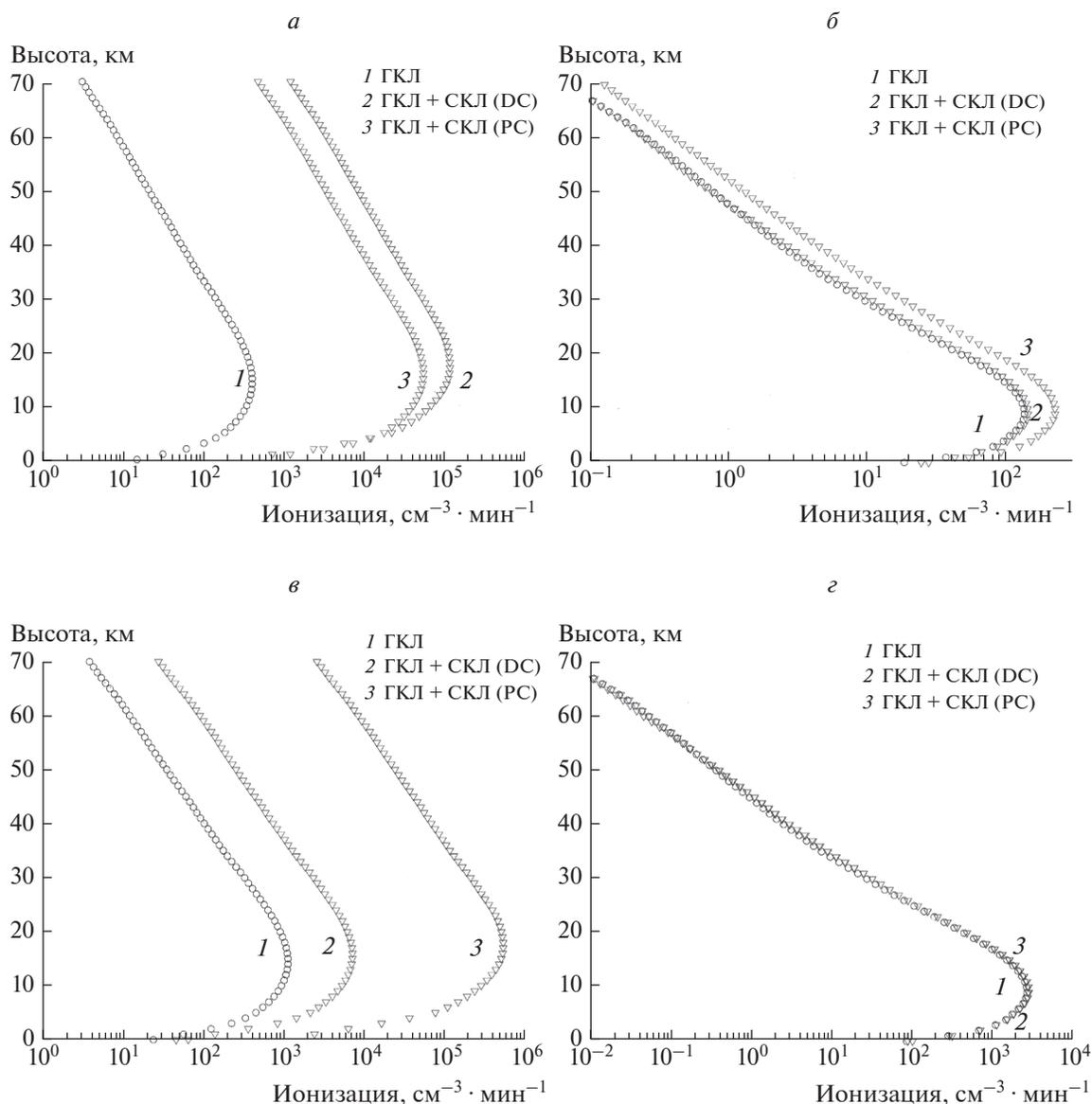


Рис. 1. Высотные профили скорости ионизации, полученные в результате моделирования прохождения первичных ГКЛ через атмосферу Земли и образования в ней каскадов вторичных КЛ с использованием “плоской” геометрии. На графиках представлены данные для события GLE69 и значений жесткости геомагнитного обрезаия 1 (а) и 5 ГВ (б), а также для события GLE70 и значений жесткости геомагнитного обрезаия 1 (в) и 5 ГВ (г).

скорости ионизации вещества в зависимости от географических координат, приведены на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодня модуль, входящий в программный комплекс RUSCOSMICS и предназначенный для расчета прохождения частиц КЛ через атмосферу Земли, позволяет рассчитывать как основные параметры потоков частиц КЛ, так и их влияние на скорость ионизации окружающего вещества. На

основании представленных в этой работе результатов можно сделать количественные и качественные оценки влияния КЛ в зависимости от характера спектра первичных протонов и значения жесткости геомагнитного обрезаия. Следует заметить, что в текущий момент первые данные, полученные для глобальной модели для случая ГКЛ во время минимума солнечной активности, собраны в базу и будут представлены в полном объеме на сайте проекта [15]. Также ведется разработка по оптимизации кода программы с целью

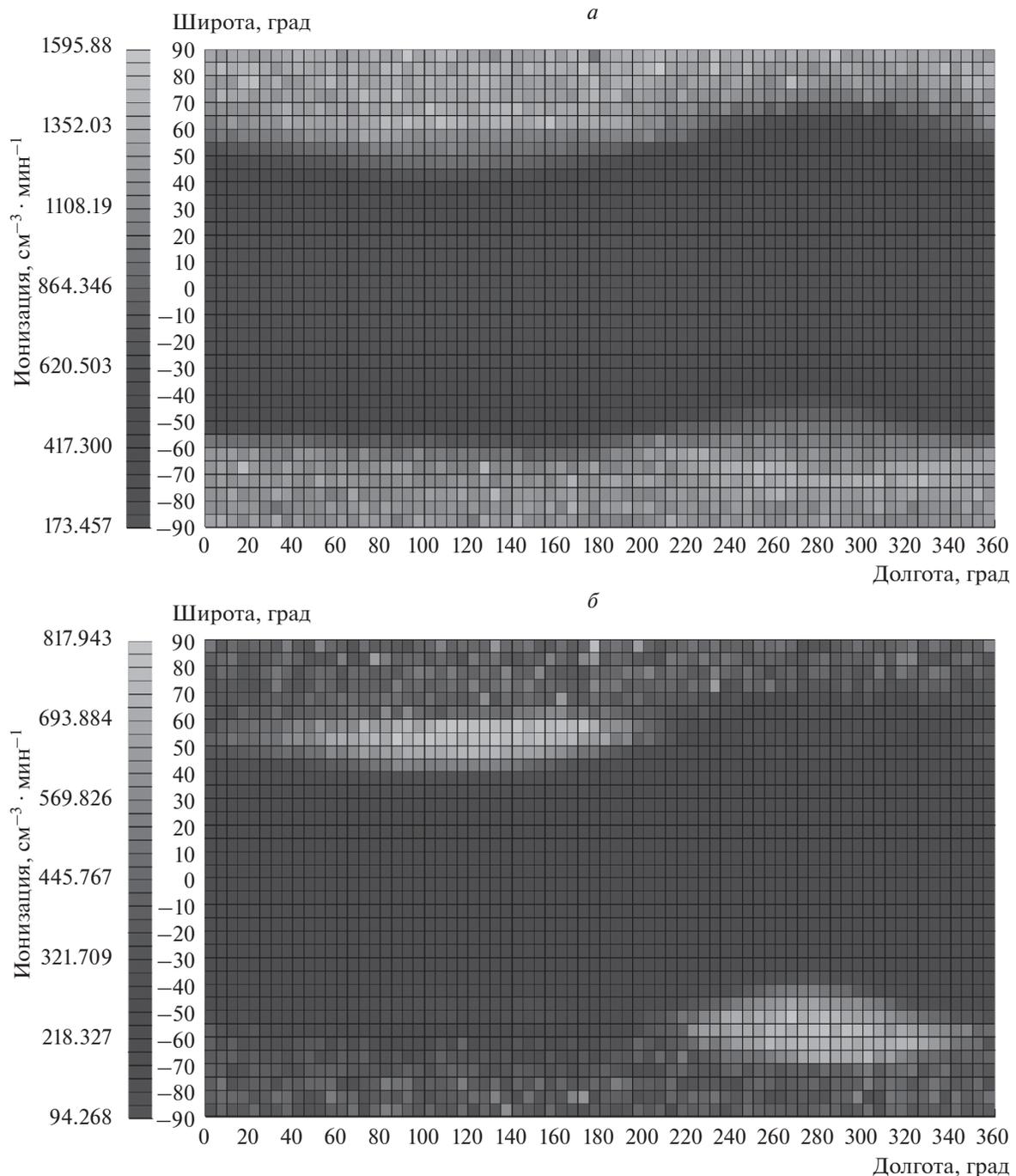


Рис. 2. Значения скорости ионизации, полученные в результате моделирования прохождения первичных ГКЛ через атмосферу Земли и образования в ней каскадов вторичных КЛ с использованием глобальной геометрии (шаг сетки 5 градусов). Данные, представленные на графиках, соответствуют высотам 12 (а) и 5 км (б) от уровня моря, и позволяют как качественно, так и количественно оценить влияние КЛ в зависимости от географических координат.

создания near-realtime модели, способной производить быстрые расчеты для событий GLE.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00626.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 462 с.
2. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. Уч. пос. М.: Наука, 1972. 670 с.

3. *Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al.* // *Adv. Space Res.* 2009. V. 44. I. 10. P. 1124.
4. *Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. Mironova I.A.* // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. D10302.
5. *Velinov P.I.Y., Balabin Yu.V., Mauricev E.A.* // *Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci.* 2017. V. 70. № 4. P. 545.
6. *Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. и др.* // *Изв. 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. № 5. P. 657.
7. *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. № 4. P. 3.
8. *Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al.* // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* 2003. V. 506. № 3. P. 250.
9. *Picone J.M. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 12A. P. S1A 15-1.
10. *Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al.* // *Earth, Planets and Space.* 2015. V. 67. P. 79.
11. *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Miroshnichenko L.I.* // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41. P. 926.
12. *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B.* // *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. V. 7. № 4. P. 459.
13. *Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Vashenyuk E.V. et al.* // *Adv. Space Res.* 2006. V. 38. I. 3. P. 418.
14. *Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Vashenyuk E.V. et al.* // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41. P. 947.
15. www.ruscosmics.ru.