

## ВЛИЯНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ НА СКОРОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ИОНОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

**Е.А. Маурчев, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Ю.В. Балабин, Б.В. Гвоздевский**

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия  
[maurchev1987@gmail.com](mailto:maurchev1987@gmail.com)

## EFFECT OF GEOMAGNETIC CUTOFF RIGIDITY ON THE RATE OF ION FORMATION WHEN SIMULATING THE PASSAGE OF PROTONS OF SOLAR COSMIC RAYS THROUGH EARTH'S ATMOSPHERE

**E.A. Maurchev, A.V. Germanenko, E.A. Mikhalko, Yu.V. Balabin, B.V. Gvozdevsky**

Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia  
[maurchev1987@gmail.com](mailto:maurchev1987@gmail.com)

**Аннотация.** Потоки протонов солнечных космических лучей (СКЛ), возникающие во время вспышек на Солнце, имеют интенсивности на порядки превышающие те же значения для галактических космических лучей в энергиях до десятков ГэВ. В том случае, если СКЛ генерируются в сторону Земли и способны достичь ее атмосферы, то станции нейтронных мониторов НМ регистрируют так называемые события GLE (Ground level enhancement), суть которого заключается в существенном возрастании скорости счета, и, соответственно, приземного фона излучения. Это напрямую связано с увеличением оставленной энергии первичными частицами на процессы ионообразования в верхних слоях атмосферы Земли (от ~30 км до 80 км), а также на образование каскадов, возникающих на больших глубинах вследствие ядерных взаимодействий. В представленной работе показан пример использования модуля программного комплекса RUSCOSMICS для расчета прохождения солнечных протонов КЛ через атмосферу Земли и влияния на них значения жесткости геомагнитного обрезания. Следует заметить, что входной параметр в виде спектральных характеристик первичных частиц получен путем моделирования при помощи данных сети станций НМ по уникальной методике, разработанной группой ученых Полярного геофизического института. Также значения жесткости геомагнитного обрезания и конусов приема получаются при помощи собственно разработанных программ.

**Ключевые слова:** ионизация, метод Монте-Карло, численное моделирование, космические лучи, физика частиц.

**Annotation.** The proton fluxes of solar cosmic rays (SCR), arising during flares on the Sun, have intensities by orders of magnitude greater than those for galactic cosmic rays at energies up to tens of GeV. If the SCR are generated towards the Earth and are able to reach its atmosphere, then the stations of NM neutron monitors register so-called GLE (Ground level enhancement) events, the essence of which is a significant increase in the counting rate and, accordingly, the surface radiation background. This is directly related to the increase in the energy left by the primary particles on the ion formation processes in the upper layers of the Earth's atmosphere (from ~30 km to 80 km), as well as on the formation of cascades arising at great depths due to nuclear interactions. This paper presents an example of using the RUSCOSMICS software module for calculating the passage of solar CR protons through the Earth's atmosphere and the influence of the geomagnetic cutoff rigidity value on them. It should be noted that the input parameter in the form of the spectral characteristics of the primary particles was obtained by modeling using the data network of NM stations using a unique technique developed by a group of scientists of the Polar Geophysical Institute. Also, the rigidity values of geomagnetic cutting and receiving cones are obtained using the actually developed programs.

**Keywords:** ionization, Monte Carlo method, cosmic rays, particle physics, numerical simulation.

### ВВЕДЕНИЕ

На станции нейтронного монитора Полярного геофизического института проводятся модельные эксперименты по расчету прохождения частиц КЛ через атмосферу Земли. Для решения задач астрофизики КЛ такого рода был специально разработан программный комплекс RUSCOSMICS [Maurchev et al., 2015; Maurchev et al., 2016] на базе пакета для разработки программ GEANT4 [Agostinelli et al., 2003]. Помимо стандартных возможностей, заключающихся в получении функций эффективности регистрации, полученный набор программ позволяет рассчитывать значения интенсивностей потоков вторичных КЛ и скорости ионизации на любой высоте и для любых значений жесткости геомагнитного обрезания. Немаловажной особенностью является то, что все полученные результаты проходят верификацию путем их сравнения с имеющимися экспериментальными данными. Пример глобальной ионо-

граммы для высоты 5 км, полученной путем моделирования прохождения галактических космических лучей (ГКЛ) через атмосферу Земли, представлен на рис. 1.

### СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ ПЕРВИЧНЫХ ГКЛ И СКЛ ДЛЯ МОДЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ЧАСТИЦ

Одним из входных параметров, определяющим свойства модельного источника протонов является его плотность вероятности, получаемая путем нормировки дифференциального энергетического спектра. Согласно ряду проведенных вычислений было показано, что пространственное распределение можно не учитывать и определять положение генератора протонов по центру верхней части рабочего объема модели атмосферы, в виде точечного источника с перпендикулярным направлением падения частиц. Такой метод позволяет улучшить статистическую точ-

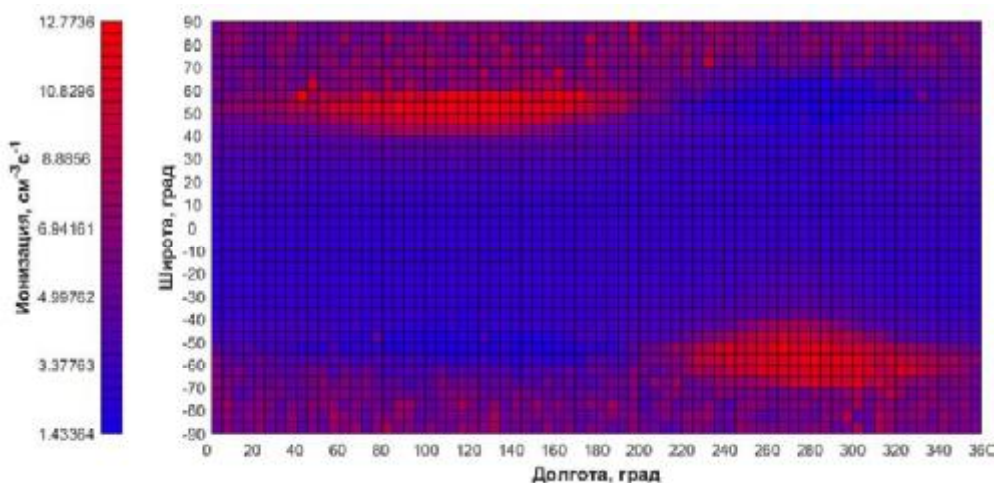


Рис. 1. Типовая ионограмма, позволяющая производить оценку скорости ионизации всей атмосферы Земли на высоте 5 км, полученная путем моделирования прохождения протонов первичных ГКЛ во время минимума солнечной активности. Данные для высот от 1 км до 80 км, с шагом в 1 км можно найти на сайте проекта [\[http://ruscosmics.ru\]](http://ruscosmics.ru)

ность получаемых характеристик потоков вторичных КЛ.

Спектр протонов СКЛ описывается при помощи модели, разработанной в ПГИ Апатиты [Vashenyuk et al., 2008, 2011; Perez-Peraza et al., 2006, 2008], согласно которой в спектре присутствуют две компоненты — быстрая (РС) и медленная (ДС), их энергетические зависимости могут быть выражены через формулы (1) и (2).

$$J_{PC} = J_0 \exp(-E/E_0), \text{ с}^{-1}\text{м}^{-2}\text{ср}^{-1}\text{ГэВ}^{-1} \quad (1)$$

$$J_{DC} = J_1 E^{-\gamma}, \text{ с}^{-1}\text{м}^{-2}\text{ср}^{-1}\text{ГэВ}^{-1} \quad (2)$$

где  $J_0, E_0, J_1, \gamma$  — коэффициенты, соответствующие событиям GLE. Например, для события GLE67 эти параметры будут равны  $J_0 = 4.6 \cdot 10^4, E_0 = 0.51, J_1 = 9.7 \cdot 10^3, \gamma = 6.3$ . Иллюстрация полученных спектров протонов СКЛ в сравнении со спектром для тех же частиц ГКЛ представлена на рис. 2.

### РЕЗУЛЬТАТ

Как уже было сказано выше, особый интерес представляют данные о скорости ионизации вещества атмосферы Земли частицами КЛ и зависимость этого

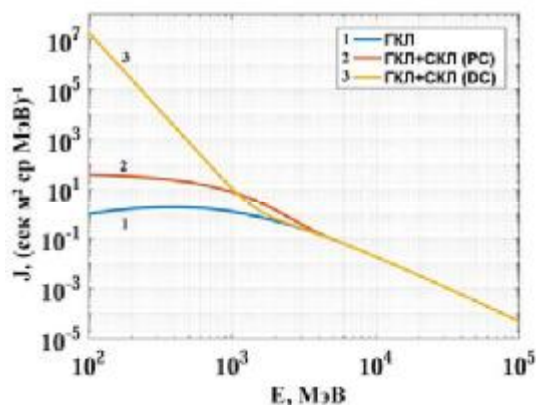


Рис. 2. Дифференциальные энергетические спектры протонов солнечных КЛ в диапазоне от 100 МэВ до 100 ГэВ для GLE № 67

процесса от значения жесткости геомагнитного обреза. Детектирующие объемы в модели устроены таким образом, что учитываются все виды ионизации, конечный результат сохраняется в виде высотных зависимостей. Иллюстрации, полученные для значений жесткости геомагнитного обреза 0.65 ГВ и 2 ГВ протонов как ГКЛ, так и СКЛ, представлены на рис. 3, их сравнение с реальным экспериментом на рис. 4.

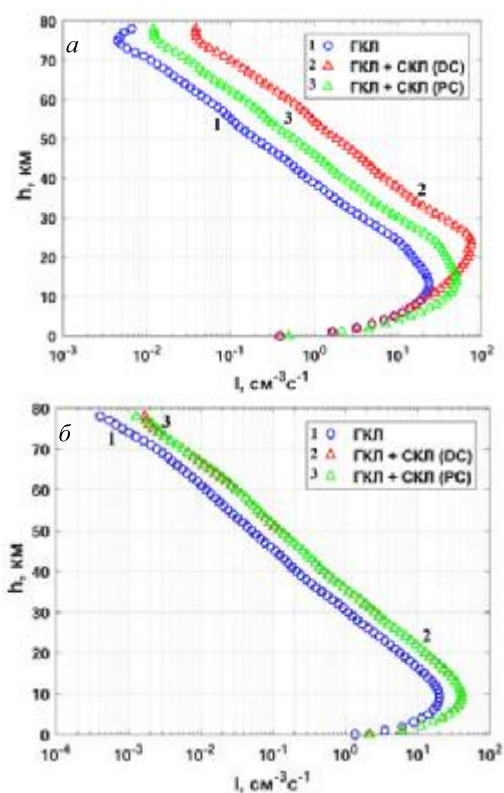


Рис. 3. Высотные зависимости скорости ионизации, полученные в результате моделирования прохождения протонов первичных ГКЛ+СКЛ для GLE67 через атмосферу Земли во время события GLE67 при значениях жесткости геомагнитного обреза 0,65 ГВ (а) и 2 ГВ (б)

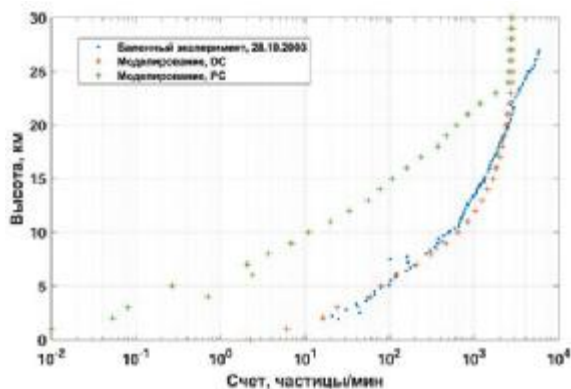


Рис. 4. На рисунке представлено сравнение результатов, полученных в ходе моделирования прохождения протонов солнечных космических лучей во время события GLE через атмосферу Земли, с данными полета шаровзондов. Видно, что совпадение наблюдается для спектра первичных протонов в медленной компоненте космических лучей. Особенностью 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, что является следствием особенности взаимодействий протонов с веществом на этих высотах при энергиях выше 10 ГэВ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований было получено, что значение жесткости геомагнитного обрезания в значительной мере влияют на процесс прохождения протонов КЛ через атмосферу Земли, особенно это сказывается на частицах СКЛ. Это связано с тем, что значительное различие в спектрах протонов СКЛ наблюдается в области энергий до 10 ГэВ. Проведенное моделирование показало, что модуль программного комплекса RUSCOSMICS подходит не только для расчета ионизации атмосферы Земли ГКЛ, но и применим в случае использования СКЛ для глобальной модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00626. The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-32-00626.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Agostinelli S., et al. Geant4 — A Simulation Toolkit // Nuclear Instruments and Methods. 2003. A 506. P. 250–303. DOI: [10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).

Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. A new numerical model for investigating cosmic rays in the Earth's atmosphere // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79, N 5. P. 657–659.

Maurchev E.A., Balabin Yu. V., RUSCOSMIC — the new software toolbox for detailed analysis of cosmic rays interactions with matter // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 4, P. 3–10.

Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V. Relativistic proton production at the Sun in the October 28<sup>th</sup>, 2003 solar event // Adv. Space Res. 2006. V. 38, iss. 3. P. 418–424. DOI: [10.1016/j.asr.2005.01082](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.01082).

Perez-Peraza J., Vashenyuk E.V., Gallegos-Cruz A., et al. Relativistic proton at the Sun in the 20 January 2005 solar event // Adv. Space Res. 2008. V. 41, iss. 6. P. 947–954. DOI: [10.1016/j.asr.2007.04.054](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.04.054).

Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Miroshnichenko L.I. Relativistic solar protons in the ground level event of 23 February 1956: the new study // Adv. Space Res. 2008. V. 41. P. 926–935.

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. Transactions. 2011. V. 7, iss. 4. P. 459–463.