

УДК 524.1-65

## РАСЧЕТ СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ ВО ВРЕМЯ СОБЫТИЯ GLE С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ОЦЕНКА ВКЛАДА В ЭТОТ ПРОЦЕСС ЧАСТИЦ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С $Z > 2$

© 2021 г. Е. А. Маурчев<sup>1</sup>, \*, Ю. В. Балабин<sup>1</sup>, А. В. Германенко<sup>1</sup>,  
Е. А. Михалко<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](mailto:maurchev1987@gmail.com)

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 20.10.2020 г.

Принята к публикации 27.11.2020 г.

Представлены результаты моделирования прохождения частиц космических лучей через атмосферу Земли для двух разных условий параметризации геометрии и энергетического спектра. В первом случае входные данные соответствуют солнечным космическим лучам, и расчеты проводятся для всех значений географической широты и долготы. Во втором случае выполнена оценка вклада ядер галактических космических лучей в скорость ионизации, при этом на данном этапе рассматривается только локальная область атмосферы.

DOI: 10.31857/S0367676521030182

### ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи (КЛ) в основном состоят из протонов (около 90% от общего числа частиц), однако в потоке также присутствуют ядра элементов с  $Z > 2$  [1]. В этой работе нами были проведены два независимых модельных эксперимента. Первый заключается в расчете скорости ионизации солнечными космическими лучами (СКЛ) всей атмосферы Земли. Второй направлен на то, чтобы сделать оценку вклада в процесс ионизации локального участка атмосферы (67.57° с.ш., 33.39° в.д. (г. Апатиты)) ядрами азота и кислорода, которые входят в состав галактических космических лучей (ГКЛ). Основанием для проведения второго эксперимента стало предположение, что при достаточно высокой энергии короткопробежных ядер КЛ (от 1 ГэВ/нуклон) возможно возникновение неупругих соударений, в ходе которых будут рождаться каскады вторичных частиц. Для решения обеих задач проведено моделирование при помощи программного комплекса RUSCOSMICS [2–4]. При расчете СКЛ здесь основной особенностью является использование реализованного нами модуля, позволяющего применять не обычную вертикальную жесткость геомагнитного обрезания, а вычислять непосредственно энергетический спектр с учетом конуса приема для каждой точки географических координат. Такое нововведение стало возможно благодаря методике, разработанной в ПГИ и использующей данные сети станций нейтрон-

ных мониторов как входной параметр [5]. В качестве основного результата проведенной работы нами приводятся полученные данные о скорости ионизации атмосферы на высотах от 0 до 80 км для глобальной модели атмосферы в случае использования протонов СКЛ как первичных частиц и для локального участка атмосферы Земли, соответствующего географическим координатам г. Апатиты, в случае использования ядер азота и кислорода ГКЛ.

Ранее нами опубликована методика расчета скорости ионизации, основанная на использовании численного метода Монте-Карло, предназначенная для расчета скорости ионизации атмосферы Земли протонами ГКЛ. При этом для решения задачи использовались программный комплекс RUSCOSMICS и сетка значений вертикальной жесткости геомагнитного обрезания [6, 7]. В этой работе, для случая расчета СКЛ было выбрано событие GLE №60 (Ground level enhancement – явление возрастания скорости счета на нейтронных мониторах) с учетом глобальной модели атмосферы и расчетом неперпендикулярной жесткости геомагнитного обрезания. При моделировании частиц ГКЛ с  $Z > 2$  рассматривается частный случай, при котором входными параметрами генератора первичных частиц являются энергетические спектры ядер азота и кислорода, при этом сами частицы моделируются не как элементарные, а как реальное ядро и состоят из набора нуклонов. Таким

образом, основной задачей выполненной работы является оценка того, насколько сильный вклад в образование вторичных частиц и ионов вносят ядра элементов с  $Z > 2$ , входящие в состав КЛ, по сравнению с протонами, а также определить форму профиля высотных кривых (в первую очередь — высоту расположения максимума профиля, поскольку фактически это значение говорит о том, в какой точке образуется каскад). При этом следует заметить, что актуальность представленной темы обусловлена как экспериментальными методами [8, 9], так и модельными экспериментами, например [10, 11].

## МЕТОДИКА

Для решения поставленных задач применялся модуль программного комплекса RUSCOSMICS, реализованный нами при помощи пакета для разработки программ GEANT4 [12, 13]. Создание собственных моделей при помощи этого инструмента обусловлено удобством при написании исходного кода для определения геометрии, процессов взаимодействия и генерации первичных частиц с заданными энергетическими характеристиками. Для этой работы рассматриваются два варианта модели атмосферы Земли. В случае расчета ядер ГКЛ с  $Z > 2$  это обычный столб воздуха высотой 80 км, разделенный на 20 слоев, в каждом из которых находится 5% вещества от общей массы (такое усреднение выбрано с целью достижения оптимального соотношения между скоростью вычислений и качеством результатов). При этом физические параметры и вертикальная жесткость геомагнитного обрезания соответствуют географическими координатами 67.57° с.ш., 33.39° в.д. (г. Апатиты). Для эксперимента с протонами СКЛ выбрана глобальная модель, в которой шаг сетки составляет 5 градусов как по широте, так и по долготе, таким образом геометрия атмосферы разделяется на сегменты, каждому из которых соответствуют свои значения физических параметров, а также значения неперпендикулярной жесткости геомагнитного обрезания. Для обоих случаев параметризация температуры, плотности и состава получаются при помощи эмпирической модели атмосферы Земли NRLMSISE-00 [14].

Для расчета взаимодействий частиц используется набор моделей, включающий в себя стандартные электромагнитные процессы, каскады Бертини для энергий ниже 9.9 ГэВ [15], выше 10 ГэВ — кварк-глюонную струнную модель [16], специальные наборы сечений для расчета взаимодействия нейтронов при низких энергиях 0.025 эВ–20 МэВ [17]. 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.

## ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Как принято во всех наших аналогичных работах, энергетические спектры протонов СКЛ получаются путем решения обратной задачи через коэффициенты связи с использованием данных сети станций нейтронных мониторов [5, 18] и могут быть выражены через формулы (1) и (2):

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

$$J_{DC} = J_1 E^{-\gamma}, \quad (2)$$

где  $J_0 = 1.3 \cdot 10^5$ ,  $E_0 = 0.62$ ,  $J_1 = 3.5 \cdot 10^4$ ,  $\gamma = 5.3$  — коэффициенты для события GLE № 60.

В случае использования ядер ГКЛ как источника первичных частиц, дифференциальный энергетический спектр можно задать согласно [19, 21], при этом зависимость удобно описывать формулой (3):

$$F_{nuc}(E) = \frac{D(E/A)^\alpha}{[10^{-2}(E/A) + B]^\gamma A} + \frac{C}{A} \exp\left(-\frac{E}{A \cdot E_0}\right), \quad (с \cdot м^2 \cdot ср \cdot МэВ)^{-1}, \quad (3)$$

где  $Z$  и  $A$  — заряд и массовое число соответственно,  $E$  — кинетическая энергия ядра,  $D$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $\alpha$ ,  $E_0$  — параметры, зависящие от фазы 11-летнего цикла,  $\gamma = 3.6$  и  $4.4$  для кислорода и азота соответственно. Для сравнения, если говорить о спектре протонов ГКЛ [19, 20], то он выражается через формулу (4):

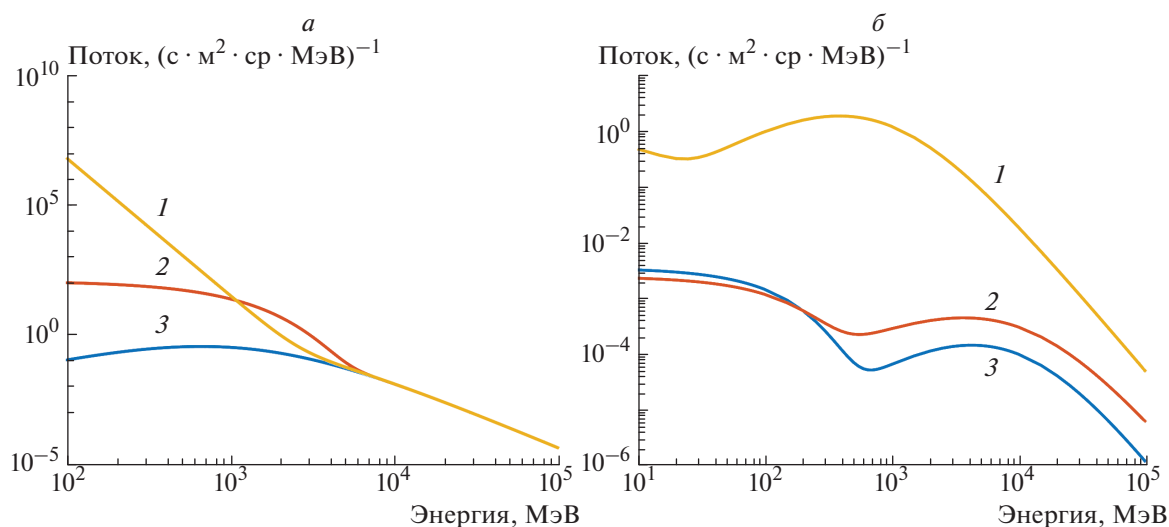
$$F(E) = \frac{D \cdot E^\alpha}{(10^{-2} \cdot E + B)^4} + C \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), \quad (с \cdot м^2 \cdot ср \cdot МэВ)^{-1}, \quad (4)$$

где  $E$  — кинетическая энергия протона,  $D$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $\alpha$  — параметры, зависящие от фазы 11-летнего цикла. Графическое представление результатов входных данных для моделирования как в случае СКЛ, так и в случае ядер ГКЛ показаны на рис. 1.

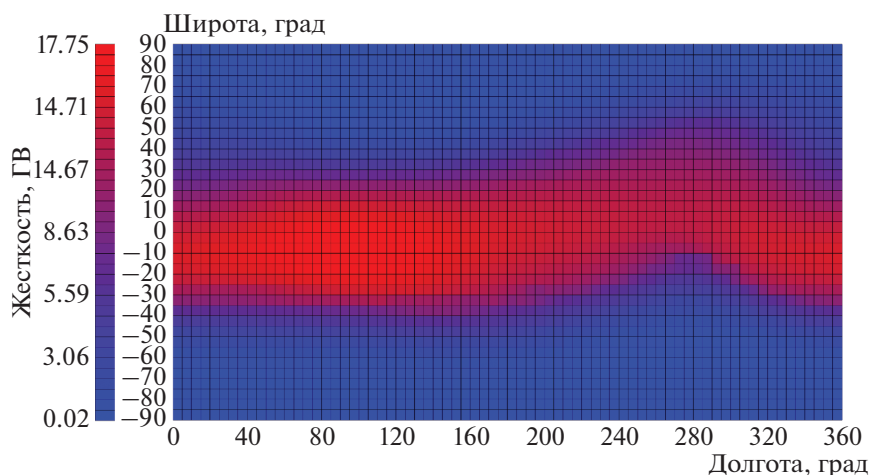
При моделировании в источнике первичных частиц создавалась функция плотности вероятности, соответствующая энергетическому спектру первичных КЛ. Высота расположения составляет 80 км, а вектор скорости потока направлен перпендикулярно вниз, в сторону верхней плоскости модели атмосферы.

## ЖЕСТКОСТЬ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ

В основе получения сетки значений жесткости  $R$  для протонов СКЛ во время события GLE № 60 лежит методика расчета конусов приема станций



**Рис. 1.** Дифференциальные энергетические спектры протонов СКЛ (а), где 1 — медленная компонента СКЛ, 2 — быстрая компонента СКЛ, 3 — ГКЛ, и ядер азота и кислорода (б), где 1 — протоны, 2 — ядра кислорода, 3 — ядра азота, используемые как входные параметры в задаче расчета скорости образования пар ионов в различных точках атмосферы Земли.



**Рис. 2.** Сетка значений невертикальной жесткости геомагнитного обрезания, используемая в моделировании.

нейтронных мониторов, применение которой описано в [5]. Этот подход был использован и в этой работе, при этом вместо станций задавались географические координаты точки для моделирования. После того, как получены характеристики функции зависимости спектра от угла и жесткости  $F(\theta, R)$ , а также массивы запрещенных и разрешенных состояний значений жесткости геомагнитного обрезания, производится расчет пелумбры и последующая нормировка для вывода энергетического спектра протонов СКЛ на границе атмосферы (в нашем случае — 80 км от уровня моря), результат может быть представлен через формулу (5):

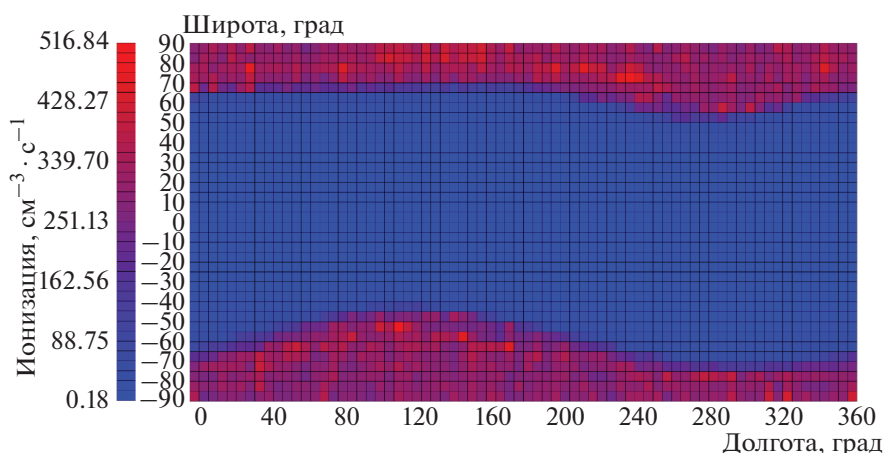
$$F_i(R)_{at\_atmosphere} = F_i(\theta, R) \cdot F_i(R)_{at\_magnetosphere} \quad (5)$$

Графическое представление полученной сетки значений жесткости геомагнитного обрезания представлено на рис. 2. Графическое представле-

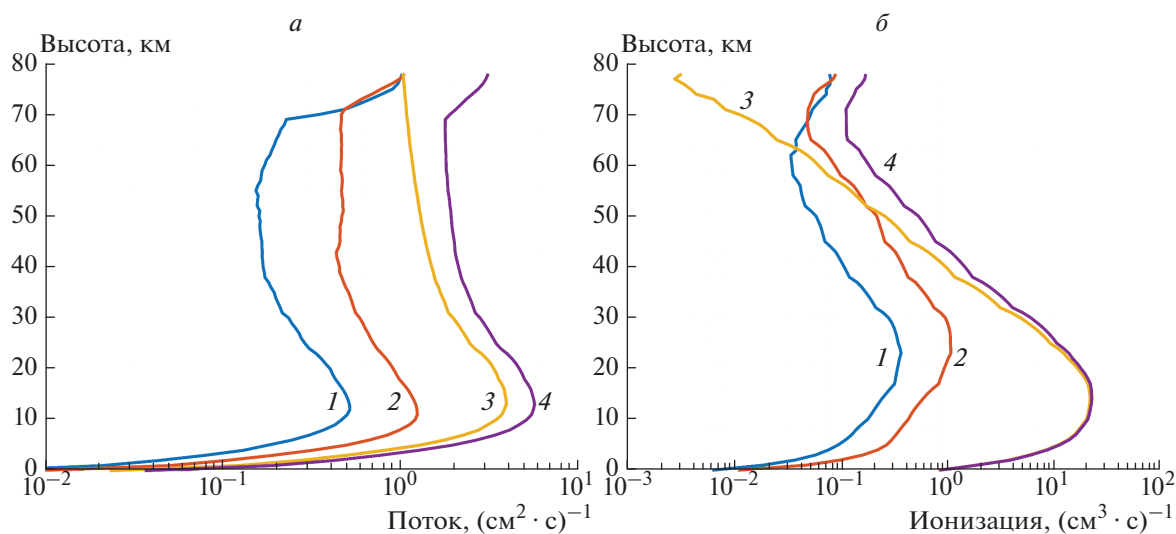
ние полученной сетки значений жесткости геомагнитного обрезания представлено на рис. 2. Более детальный результат, полностью учитывающий влияние большого диапазона значений, представлен на сайте [23], в разделе “Космические лучи”.

Для ядер необходимое значение вертикальной жесткости геомагнитного обрезания вычисляется в зависимости от заданной широты и долготы с использованием модели IGRF [22], например, в этой работе для  $65.57^\circ$  с.ш.,  $33.39^\circ$  в.д. параметр  $R_{cutoff} = 0.65$  ГВ. Минимальная энергия частиц, попадающих на границу атмосферы в случае изотропного излучения, будет зависеть от их типа и определяется формулой (6) [19]:

$$E = -M_0^2 + \sqrt{M_0^2 + \left(\frac{Z}{A} R\right)^2}, \quad (6)$$



**Рис. 3.** Значения скорости ионизации, полученные в результате моделирования прохождения протонов первичных СКЛ через атмосферу Земли с использованием глобальной геометрии (шаг сетки  $5^\circ$ ) для высоты 10 км над уровнем моря.



**Рис. 4.** Высотные профили потоков вторичных частиц (а) и скорости ионизации вещества атмосферы Земли (б), полученные в результате моделирования прохождения первичных частиц ГКЛ. 1 — ядра азота, 2 — ядра кислорода, 3 — протоны, 4 — суммарно.

где  $M_0$  — масса покоя частицы (0.938 ГэВ — для протонов и 0.939 ГэВ/нуклон — для ядер),  $Z$  и  $A$  — заряд и массовое число соответственно,  $R$  — значение жесткости в ГВ. Тогда минимальная граница для энергий частиц, падающих на границу атмосферы (условно в модели это 80 км) для географических координат г. Апатиты будет следующей: протоны — 0.26 ГэВ, ядра кислорода — 1.728 ГэВ/ядро, ядра азота — 1.512 ГэВ/ядро.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с описанными выше методами нами были проведены расчеты как в случае использования спектра протонов СКЛ для глобальной модели атмосферы, так и спектра ядер ГКЛ для локальной. В результате были получены мас-

сивы данных, включающие профили скорости образования ионов на высотах от 0 до 80 км для локального участка атмосферы в случае использования ядер ГКЛ как первичных частиц и для глобальной модели в случае использования протонов СКЛ как первичных частиц. Иллюстрации типовых графиков представлены на рис. 3 и 4. Следует заметить, что рисунки в цветном формате и высоким разрешением для всех высот можно найти на сайте [23], а также в приложении RUSCOSMICS, опубликованном на Google Play.

Полученные в этой работе данные позволяют оценить, насколько солнечные вспышки, генерирующие протоны СКЛ, которые достигают магнитосферы Земли, могут влиять на изменение общей картины ионизации атмосферы. Как количественным, так и качественным показателем здесь

являются представляемые нами ионограммы. Эта информация может быть полезна не только в фундаментальных исследованиях, позволяющих лучше понять процесс развития каскадов частиц в атмосфере Земли, но и в прикладных задачах, таких как радиационная безопасность. Одной из наиболее актуальных тем на сегодня остается оценка дозы, получаемой при совершении трансатлантических перелетов.

Основной целью при расчете прохождения ядер с  $Z > 2$  через атмосферу Земли, как было отмечено, является количественная оценка вклада этих частиц в скорость образования ионов в нижней атмосфере для области высоких широт. Моделирование показало, что в абсолютной величине скорости ионизации имеется прирост начиная от высот в 30 км (в 2–3 раза), принимающий значительную величину на 70–80 км (до двух порядков). Увеличение потока вторичных частиц в полтора – два раза наблюдается на протяжении всех высот. Предположительно, такое различие профилей обусловлено большим числом образующихся гамма-квантов.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей: Уч. пособ. для вузов. М.: Университетская книга. Логос, 2007. 488 с.
2. 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. No. 5. P. 657.
3. Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Германенко А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 711; *Maurchev E.A., Mikhalko E.A., Germanenko A.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 653.
4. 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. P. 3.
5. *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. et al.* // ASTRA. 2011. V. 7. No. 4. P. 459.
6. *Gvozdevsky B.B., Belov A.B., Eroshenko E.A. et al.* // Proc. 42nd COSPAR Sci. Assembly (California, 2018).
7. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. и др. // Солн.-земн. физ. 2019. Т. 5. № 3. С. 81; *Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Germanenko A.V. et al.* // Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 5. No. 3. P. 68.
8. *Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya, G.A. et al.* // Adv. Space Res. 2009. V. 44. No. 10. P. 1124.
9. *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Y.I. et al.* // J. Atm. Sol. Terr. Phys. 2016. V. 149. P. 258.
10. *Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Mironova I.A.* // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. No. D10302.
11. *Velinov P.I.Y., Balabin Yu.V., Maurchev E.A.* // Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci. 2017. V. 70. No. 4. P. 545.
12. *Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2003. V. 506. Sect. A. P. 250.
13. *Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 186.
14. *Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.* // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. No. A12. P. 1468.
15. *Heikkinen A., Stepanov N., Wellish J.P. et al.* // arXiv: nucl-th/0306008. 2003.
16. *Amelin N.S., Gudima K.K., Toneev V.D. et al.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1990. V. 51. P. 327.
17. *Garny S., Leuthold G., Mares V. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2009. V. 56. No. 4. P. 2392.
18. *Perez-Peraza J., Vashenyuk E.V., Gallegos-Cruz A. et al.* // Adv. Space Res. 2008. V. 41. No. 6. P. 947.
19. ГОСТ 25645.150-90. Лучи космические галактические. Модель изменения потоков частиц.
20. ГОСТ 25645.122-85. Протоны галактических космических лучей. Энергетические спектры.
21. ГОСТ 25645.124-85. Группа средних ядер галактических космических лучей. Энергетические спектры.
22. *Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al.* // Earth Planet Space. 2015. V. 67. No. 79. P. 1.
23. [www.ruscosmics.ru](http://www.ruscosmics.ru).

### Calculation of the ionization during the GLE event with the global Earth atmosphere model and evaluation of the contribution to this process of the galactic cosmic rays particles with $Z > 2$

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

<sup>a</sup>Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

\*e-mail: [maurchev1987@gmail.com](mailto:maurchev1987@gmail.com)

We present the simulation results for two different conditions for parameterizing the geometry of the Earth's atmosphere and the spectrum of primary cosmic rays. In the first case, the input data correspond to solar cosmic rays and calculations are carried out for all values of geographical latitude and longitude. The second part is devoted to assessing the contribution of the nuclei of galactic cosmic rays, while at this stage only the local region of the atmosphere is considered.