

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.143-145

ИОНИЗАЦИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПРОТОНАМИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СЛУЧАЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ ЗНАЧЕНИЙ ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ

Е.А. Маурчев, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздецкий

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

Аннотация. Вторгаясь в атмосферу Земли, космические лучи (КЛ) испытывают множество взаимодействий с окружающим их веществом, теряя при этом свою энергию. Одним из важных для исследования процессов является ионизация, которая индуцируется этими частицами в большом диапазоне высот, начиная примерно от 80 км и вплоть до уровня земли. При этом, в зависимости от их начальной энергии меняется, соответственно, и скорость ионообразования. В представленной работе рассматривается моделирование прохождения протонов галактических КЛ (ГКЛ) в случае использования глобальной геометрии атмосферы, построенной на базе NRLMSISE-00, при этом шаг сетки для выбора физических параметров (температура, плотность, состав) составляет 5 градусов. Спектр первичных частиц соответствует минимуму солнечной активности, а значения жесткости геомагнитного обрезания получены посредством модели IGRF. Результатом вычислений является карта ионизации атмосферы Земли для интервала широты от -90 до 90 градусов, долготы от 0 до 360 градусов и высоты от 0 до 80 км. Также производится верификация модельных данных при помощи высотных профилей скорости счета, полученных в ходе эксперимента по запуску шаров-зондов с установленными на них счетчиками Гейгера.

Введение

Первичные космические лучи принято разделять на галактические (ГКЛ) и солнечные (СКЛ), при этом на долю протонов приходится около 90 %, остальные 10 % - это электроны, альфа-излучение и ядра элементов с $Z > 2$. По этой причине в представленной статье внимание уделяется именно протонам, а остальные компоненты являются областью исследования других работ. Вторгаясь в атмосферу Земли, эти частицы теряют свою энергию на процессы ионизации (выше 15-30 км) или неупругие соударения с ядрами воздуха (ниже 15-30 км) [1]. Во втором случае образуются каскады вторичных частиц, упрощенная блок-схема такого явления представлена на рис. 1 [2].

Некоторые из родившихся частиц являются весьма короткоживущими, а такие как протоны, электроны, мюоны, нейтроны и гамма-кванты проходят относительно большие расстояния, вплоть до уровня Земли. Благодаря этому их можно регистрировать при помощи специальных детекторов – газоразрядных счетчиков или сцинтилляционных кристаллов, которые используются в оборудовании с различной конфигурацией, причем на сегодня экспериментальный метод является самым проверенным и широко используемым [3]. Однако, несмотря на свою доступность, такой подход имеет ряд ограничений, которые выражаются в том, что детектирующие устройства можно использовать в строгой локализации, а портативное оборудование не позволяет проводить непрерывное наблюдение в широком временном диапазоне. Поэтому в последнее время все чаще и чаще в задачах физики космических лучей используется численное моделирование [4,5]. При этом нужно помнить, что результаты вычислений в обязательном порядке должны быть верифицированы данными реального эксперимента. В представленной работе показаны результаты использования программного комплекса RUSCOSMICS [6,7] для вычисления скорости ионизации атмосферы Земли с учетом значения жесткости геомагнитного обрезания (шаг географической сетки равен 5 градусам). Для этого в качестве первичного источника частиц использовался модельный генератор с характеристиками, соответствующими энергетическому спектру протонов ГКЛ во время минимума солнечной активности. Такой выбор был сделан из того, что для такого периода у авторов имеются высотные профили скорости счета, полученные во время запуска шаров-зондов (регулярный эксперимент проводится группой ученых ФИАН [3]), которые отлично подходят для верификации модели.

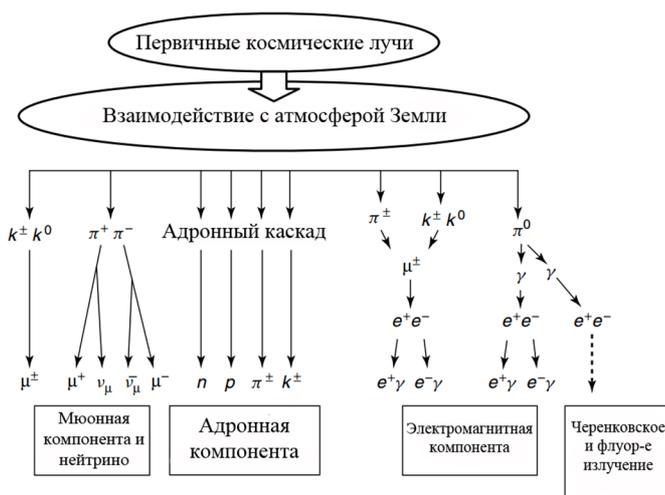


Рисунок 1. Упрощенная блок-схема, показывающая принцип образования каскадов вторичных частиц и их типов при прохождении протонов первичных КЛ с энергией выше 1 ГэВ.

Методика и результат

Для параметризации атмосферы Земли в представленной работе использовалась модель NRLMSISE-00 [8], при этом получается так называемая «плоская» геометрия, при которой столб воздуха выглядит как показано на рис. 2, где его высота составляет 30 км, в реальности при моделировании используется значение 80 км. При этом следует заметить, что масса вещества в каждом слое установлена в размере 5 % от всей общей массы столба. Такое значение выбрано эмпирически, при нем достигается наибольшая точность при минимальном времени вычисления.

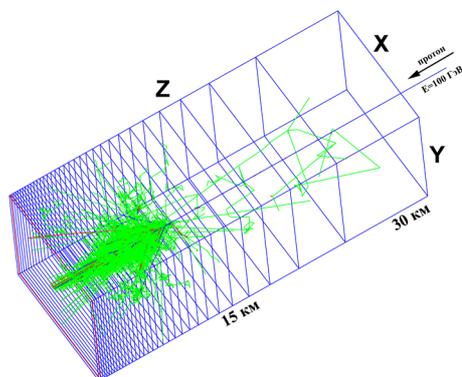


Рисунок 2. Иллюстрация плоской модели атмосферы и моделирования прохождения через нее протона с энергией 100 ГэВ, а также образования каскада вторичных частиц.

Генератор первичных частиц устроен таким образом, что в качестве входного параметра используется дифференциальный энергетический спектр частиц, пример такой величины для протонов ГКЛ представлен на рис. 3. Специальный парсер преобразует этот спектр в нормированную функцию плотности вероятности и создает соответствующий генератор случайной величины. В результате получается модельный источник, характеристики которого максимально приближены к реальным. При моделировании глобальной атмосферы Земли с шагом в 5 градусов используется также сетка значений жесткостей геомагнитного обрезания [9]. Как результат получают данные, позволяющие оценить скорость ионизации в разных географических точках и на высотах от 0 до 80 км с шагом 1 км. Типовой результат для высоты 10 км (примерный потолок для полета пассажирских лайнеров) представлен на рис. 4, остальные данные можно найти на сайте проекта <http://ruscosmics.ru/CR>.

Заключение

В ходе работы показано как значение жесткости геомагнитного обрезания влияет на скорость ионообразования, вызванное прохождением протонов первичных ГКЛ через атмосферу Земли для периода минимума солнечной активности. Также показано, что полученные данные отлично подходят для использования оценки дозы радиации на маршрутах авиалайнеров, выполняющих регулярные перелеты в области высоких широт.

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

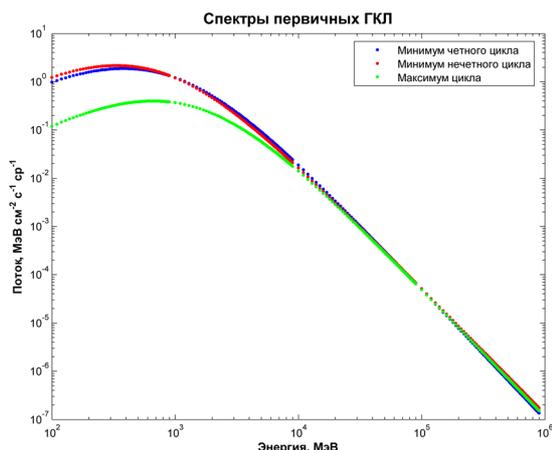


Рисунок 3. Дифференциальные энергетические спектры протонов ГКЛ, используемые как входной параметр при моделировании источника первичных частиц в задаче расчета каскадов вторичных частиц в атмосфере Земли. Следует указать, что в представленной работе при моделировании используются усредненные значения для минимумов, поскольку они отличаются несущественно, а в области высоких энергий и вовсе равны.

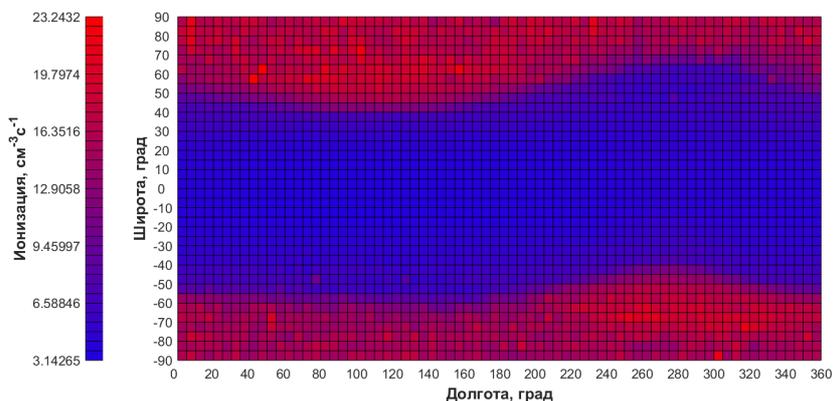


Рисунок 4. Ионограмма, соответствующая высоте 10 км над уровнем моря. Результат получен при помощи глобальной модели и для источника первичных протонов, имеющих энергетический спектр первичных ГКЛ во время минимума солнечной активности.

Литература

1. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. «Наука», Москва, 1975.
2. Filges D., Handbook of Spallation Research: Theory, Experiments and Applications, 2009, DOI:10.1002/9783527628865
3. Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al. // Adv. in Space Res. 2009. V. 44. Is. 10. P. 1124-1137.
4. Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Mironova I.A. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D10302.
5. Velinov P.I.Y., Balabin Yu.V., Maurchev E. A. // Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci. 2017. V. 70. Is. 4. P. 545-555.
6. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. и др. // Известия РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 711.
7. 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]
8. Picone J.M. et al., NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. J. Geophys. Res. 107(A12). 1468. 2002.
9. Gvozdevsky B., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Gushcina R., Ptuskin V., Geomagnetic cutoff rigidities of cosmic rays and their specular changes / Proc. 42nd COSPAR Scientific Assembly. California, USA, 2018. ID. D1.2-31-18. 2018.