Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2024. С. 60–62.

УДК 524.1 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-60

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОТОНОВ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА СКОРОСТЬ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Е.А. Маурчев, К.А. Диденко, Н.С. Шлык, М.А. Абунина, А.А. Абунин, А.В. Белов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия, maurchev@izmiran.ru

INVESTIGATION OF THE SOLAR COSMIC RAY PROTONS IMPACT ON THE EARTH'S ATMOSPHERE IONIZATION RATE

E.A. Maurchev, K.A. Didenko, N.S. Shlyk, M.A. Abunina, A.A. Abunin, A.V. Belov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, maurchev@izmiran.ru

Аннотация. В работе проведено моделирование прохождения протонов космических лучей, а также вторичной компоненты через атмосферу Земли для периодов, соответствующих реальным событиям солнечных энергетических частиц (SEP). Приводится анализ спектральных характеристик потоков первичных протонов. В качестве основного результат работы показаны количественные оценки расчетной скорости ионизации в большом диапазоне высот (0–100 км). Оценивается разница во влиянии солнечных протонов на атмосферу Земли для событий SEP с аналогичными источниками, но с различающимися спектральными энергетическими характеристиками потоков первичных частиц.

Ключевые слова: скорость ионизации, солнечные энергичные частицы, численное моделирование.

Abstract. This paper considers the modeling of the cosmic ray protons transport as well as the secondary component through the Earth atmosphere for periods corresponding to real events of solar energetic particles (SEP). We carried out an analysis of the primary proton flux spectral characteristics. The main work results are quantitative estimates of the calculated ionization rate for an altitude range from 0 to 98 km. Also, our work includes an estimation of the difference in the effect of solar protons on the Earth's atmosphere for SEP events with similar sources, but with different spectral energy characteristics of primary particle fluxes.

Keywords: ionization rate, solar energetic particles, numerical simulation.

ВВЕДЕНИЕ

В представленной работе рассматриваются протоны космических лучей (КЛ). КЛ принято разделять на галактические (ГКЛ) и солнечные (СКЛ). Энергия первых может достигать порядка ТэВ, в то время как вторые в большинстве случаев имеют энергию максимум 10 ГэВ. Попадая в атмосферу Земли, протоны теряют свою энергию на ионизацию, а при достаточных энергиях (более чем ~ 1 ГэВ) могут достигать высоты 10–25 км от уровня моря и рождать каскады вторичных частиц. Эти частицы, в свою очередь, также оставляют свою энергию в атмосфере. Следует заметить, что все эти процессы изучались другими научными группами и до сих пор представляют интерес [Bazilevskaya et al., 2008; Mironova et al., 2015; Usoskin, Kovaltsov, 2006].

Наряду с воздействием протонов ГКЛ на атмосферу Земли можно выделить относительно кратковременные явления солнечной активности — события SEP (solar energy particles) и GLE (ground level enchantment), которые также могут оказывать существенное влияние на состояние атмосферы [Jackman et al., 2005; Kirillov et al., 2003]. Протоны во время событий SEP обладают довольно мягким дифференциальным энергетическим спектром, что говорит о их незначительной способности генерировать каскады и ионизировать нижние слои атмосферы (от уровня моря почти до 30 км). Однако такие явления часто характеризуются значительным (до нескольких порядков) увеличением потоков частиц в диапазоне энергий от 10 до 100 МэВ, что, как можно ожидать, приведет к увеличению ионизации верхних слоев атмосферы Земли (от 30 км до 100 км) и потенциально повлияет на ее химические свойства в высоких широтах.

В этой работе мы рассматриваем семь событий с аналогичными солнечными источниками за последние три цикла солнечной активности. Было проведено моделирование прохождения протонов первичных КЛ через атмосферу Земли с использованием нашего собственного программного комплекса, реализованного с использованием пакета для разработки программ GEANT4 [Allison et al., 2016]. Оценивается влияние частиц СКЛ на степень ионизации атмосферы Земли. Представлены профили ионизации для широкого диапазона высот от 0 до 98 км. Предполагается, что полученные результаты могут быть полезны для исследований в области влияния космического излучения на атмосферу Земли.

МЕТОДИКА

Для этого исследования была использована база данных по рентгеновским вспышкам и протонным возрастаниям [Белов, 2017]. Возрастания потоков во время событий SEP выбраны на основе измерений протонов с энергией E>10 МэВ (P10) и E>100 МэВ (P100) и соответствующих им рентгеновским вспышкам при помощи спутника GOES. Также были проанализированы данные всемирной сети нейтронных мониторов (NMDB).

В данной работе для расчета значений скорости ионизации был использован программный комплекс RUSCOSMICS [Маурчев, Балабин, 2016]. Его реализация основана на использовании пакета для разработки программ GEANT4, который использует метод Монте–Карло и предоставляет классы для разработки моделей взаимодействия элементарных частиц с веществом [Allison et al., 2016]. На рис. 1 представлена визуализация модели и пример трекинга протонов.

Рис. 1. Пример моделирования прохождения частиц первичных и вторичных КЛ через атмосферу Земли с использованием модели RUSCOSMICS, показана лишь одна проекция геометрии атмосферы. На рисунке представлены геометрия атмосферы в «плоском» приближении, источник первичных протонов, определенный как точечный с изотропным угловым распределением, а также трекинг вторичных частиц. Атмосфера разделена на слои с одинаковым процентным содержанием воздуха и параметризованная при помощи модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]. Красными линиями показаны положительно заряженные частицы, синими — отрицательно, зелеными — нейтроны, желтыми — фотоны

На рис. 2 показаны дифференциальные энергетические спектры, полученные из данных спутника GOES для событий SEP и из данных сети станций нейтронных мониторов для событий GLE.

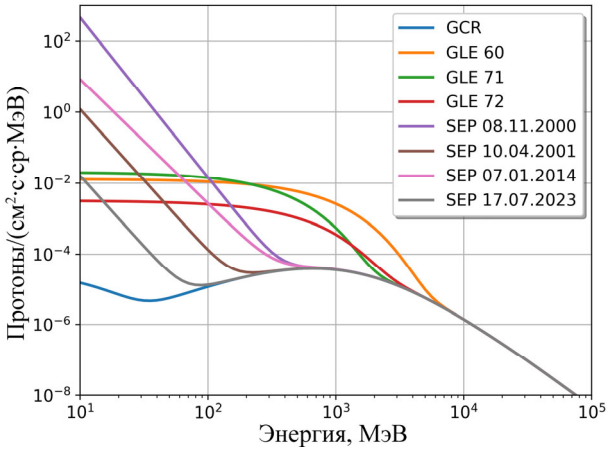

Рис. 2. Полученные из данных GOES (SEP) и по данным сети станций НМ (GLE) спектры протонов СКЛ, используемые для параметризации первичного источника частиц в модели прохождения КЛ через атмосферу Земли

Результаты

В качестве главного результата представленного моделирования были получены высотные профили ионизации (рис. 3). Наборы данных получены для двух значений жесткости геомагнитного обрезания (0.17 ГВ и 0.64 ГВ) и в большом диапазоне высот (0-98 км с шагом 1 км). На иллюстрациях хорошо видно, что максимум образования ионных пар для протонов ГКЛ находится на высотах 10–15 км. Для частиц СКЛ этот максимум смещается выше и лежит в диапазоне 30–50 км. Эти результаты находятся в хорошем согласии с данными, представленными в работах [Bazilevskaya et al., 2008; Mironova et al., 2015]. Также очевидно влияние значения жесткости геомагнитного обрезания. Частицы во время событий SEP существенно влияют на ионообразование на высотах от 50 до 100 км, что связано с увеличением значения потока для протонов до 100 МэВ. Вместе с тем, вклад низкоэнергичных протонов становится незначительным уже при значениях жесткости геомагнитного обрезания более 0.64 ГВ и здесь на атмосферу влияют только частицы из событий GLE.

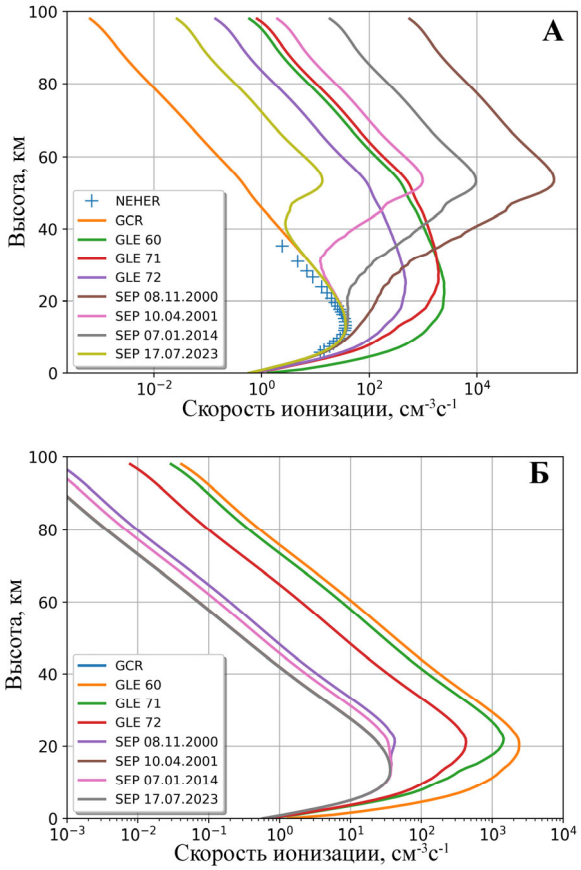

Рис. 3. Расчетная скорость ионизации, полученная при помощи моделирования прохождения протонов КЛ через атмосферу Земли как для случая ГКЛ, так и во время событий SEP и GLE. Данные представлены для двух значений жесткости геомагнитного обрезания — 0.17 ГВ (А) и 0.64 ГВ (Б). Также на (А) видно хорошее согласие с экспериментальными данными, полученными в [Neher, 1971]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены семь событий с аналогичными солнечными источниками, но относящимися к трем разным солнечным циклам. С использованием современных подходов и экспериментальных данных были получены спектры протонов СКЛ всех проанализированных событий. Проведена оценка скорости ионизации при помощи модели RUSCOSMICS, разработанной нами для расчетов прохождения частиц КЛ через атмосферу Земли. Профили скорости ионизации получены для всех рассмотренных событий SEP и GLE и для двух значений жесткости геомагнитного обрезания. Это позволяет количественно оценить влияние протонов СКЛ на атмосферу Земли в области высоких широт и авроральных зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белов А.В. Вспышки, выбросы, протонные события // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Вып. 57, № 6. С. 783–793.

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Модельный комплекс для исследования космических лучей // Солнечно-земная физика. 2016. Вып. 2, № 4. С. 3–8.

Allison J., Amak K., Apostolakis J. et al. Recent developments in Geant4 // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. V. 835. P. 186–225.

Bazilevskaya G.A., Usoskin I.G., Flückiger E.O. et al. Cosmic Ray Induced Ion Production in the Atmosphere // Space Sci Rev. 2008. V. 137. P. 149–173.

Jackman C.H., Deland M.T., Labow G.J. et al. The influence of the several very large solar proton events in years 2000 2003 on the neutral middle atmosphere // Adv. Space Res. 2005. V. 35. P. 445–450.

Kirillov A.S., Belakhovsky V.B., Maurchev E.A. et al. Vibrational Kinetics of NO and N2 in the Earth's Middle Atmosphere During GLE69 on January 20, 2005 // J. Geophys. Res. Atmosph. 2003. V. 128. e2023JD038600.

Mironova I.A., Aplin K.L., Arnold F. et al. Energetic Particle Influence on the Earth's Atmosphere // Space Sci Rev. 2015. V. 194. P. 1–96.

Neher H.V. Cosmic rays at high latitudes and altitudes covering four solar maxima // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 1637–1651.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. Article number: 1468.

Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. Cosmic Ray Induced Ionization in the Atmosphere: Full Modeling and Practical Applications // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D21206

.