

УДК 524.1, 550.3

**ИЗМЕНЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В
ОТДЕЛЬНЫХ ПУНКТАХ АЗИАТСКОГО РЕГИОНА
В ПЕРИОД ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ 2003 г.**

В.М. Дворников[†], В.Е. Сдобнов

**VARIATIONS IN GEOMAGNETIC CUTOFF RIGIDITY OF COSMIC RAYS IN SOME REGIONS OF
ASIA DURING THE 2003 EXTREME EVENTS**

V.M. Dvornikov[†], V.E. Sdobnov

По данным наземных измерений интенсивности космических лучей на мировой сети станций и космических аппаратах GOES рассчитаны изменения жесткости геомагнитного обрезания в Иркутске, Алма-Ате и Пекине в октябре–ноябре 2003 г. Рассчитанные изменения жесткости геомагнитного обрезания представлены вместе с D_{st} -вариациями геомагнитного поля. Проведено сравнение полученных результатов с результатами расчетов по модели магнитосферы Цыганенко.

Variations of geomagnetic cutoff rigidity in Irkutsk, Alma-Ata and Beijing in October–November 2003 were calculated with data from ground-based observations of cosmic ray intensity at the world-wide network of stations and GOES spacecrafts. The calculated variations in geomagnetic cutoff rigidity are presented together with D_{st} -variations of the geomagnetic field. The obtained results are compared with calculation results from the Tsyganenko model of the magnetosphere.

Введение

Возмущения магнитного поля Земли во время магнитных бурь могут приводить к существенному изменению траекторий заряженных частиц в магнитосфере, вплоть до того, что разрешенные траектории могут стать запрещенными и наоборот. Это приводит к двум главным следствиям для наземных наблюдений: 1) изменяются эффективные пороги обрезания; 2) изменяются эффективные асимптотические направления прихода частиц и, следовательно, приемные коэффициенты для различных станций.

Магнитосферный эффект, связанный с изменением жесткостей обрезания, может быть достаточно велик, чтобы существенно изменить поведение временного хода вариаций интенсивности космических лучей (КЛ), наблюдаемых на средне- и низкоширотных станциях, по сравнению с временным ходом вариаций интенсивности КЛ на высокоширотных станциях, где этот эффект не наблюдается.

Большие магнитосферные эффекты в КЛ, как правило, наблюдаются одновременно с большими модуляционными эффектами КЛ, обусловленными электромагнитными процессами в межпланетном пространстве, поскольку в основе и тех и других лежат одни и те же причины. Интерес к магнитосферным вариациям интенсивности КЛ обусловлен, во-первых, с физической точки зрения, т. е. с точки зрения образования, развития и распада магнитосферных токовых систем. Кроме того, изменения пороговых жесткостей геомагнитного обрезания (ЖГО), полученные при исследовании геомагнитных эффектов в КЛ, могут служить дополнительным источником информации для проверки тех или иных моделей магнитосферы Земли. Во-вторых, магнитосферные эффекты важны с методической точки зрения, поскольку мешают изучать внеземные вариации КЛ и по возможности должны быть удалены из экспериментальных данных.

Методические вопросы учета магнитосферной составляющей в вариациях интенсивности КЛ и определения изменений ЖГО в периоды различных магнитных бурь рассматривались в работах [Dvornikov, Sdob-

nov, 1993; Baisultanova, et al. 1987; <http://kosmofizika.ru/buri/buri.htm>; Belov, et al. 2005]. В данной работе исследовались изменения пороговых ЖГО в период мощных спорадических явлений в гелиосфере в октябре–ноябре 2003 г.

Данные и метод

Для анализа использовались усредненные за часовые временные интервалы данные наблюдений интенсивности протонов в энергетических диапазонах 4–9, 9–15, 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ, полученные на спутнике GOES-11 [<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>], и данные о вариациях интенсивности КЛ различных жесткостей, полученные методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [Dvornikov, Sdobnov, 1998; Dvornikov, Sdobnov, 1982] по наземным измерениям на мировой сети нейтронных мониторов (44 станции). Амплитуды модуляции отсчитывались от спокойного уровня 12 октября 2003 г.

Методом СГС получена информация о вариациях углового и энергетического распределения первичных КЛ за пределами магнитосферы Земли, а также об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений.

При этом решалась следующая система нелинейных алгебраических уравнений:

$$\frac{\delta I_C^i}{I_C^i}(h_i) = -\Delta R_C W_C^i(R_C, h_i) \times \left(1 + \frac{\delta J}{J}(R_C)\right) + \int_{R_C}^{\infty} \frac{\delta J}{J}(R) W_C^i(R, h_i) dR. \quad (1)$$

Здесь $\delta I_C^i / I_C^i(h_i)$ – амплитуда вариаций потока вторичных частиц типа i (относительно некоторого фонового уровня I_C^i), наблюдаемых в географическом пункте C на уровне h_i в атмосфере Земли; R_C – эффективная жесткость геомагнитного обрезания; $W_C^i(R, h_i)$ – функция связи между первичными и вторичными вариациями КЛ; $\delta J / J(R)$ – амплитуда вариаций первичного спектра. В методе СГС используется формальная математическая аппрокси-

мация $\delta J/J(R)$. Зависимость изменения пороговой жесткости геомагнитного обрезания ΔR_C от пороговой жесткости аппроксимирована выражением $\Delta R_C(R_C) = (b_1 R_C + b_2 R_C^2) e^{-\sqrt{R_C}}$. Станции КЛ распределены по земному шару неравномерно, поэтому в расчетах не учитывался долготный эффект в планетарных изменениях ЖГО космических лучей.

Для станций КЛ, расположенных в диапазоне ЖГО от ~ 1 до ~ 2 ГВ, коэффициенты связи около пороговой жесткости малы, и при решении системы нелинейных уравнений точность определения значений спектра в этом жесткостном интервале невысока, следовательно, недостаточно хорошо определяются значения изменений ЖГО (ΔR_C).

Для того чтобы улучшить точность определения ΔR_C , для таких станций используется спектр, полученный с привлечением данных в нескольких энергетических диапазонах с космических аппаратов GOES.

Жесткостный дифференциальный спектр КЛ в широком энергетическом интервале ищется в виде [Dvornikov, et al., 2007]

$$J(R) = A \left[\frac{(\varepsilon^2 - \varepsilon_0^2)}{(\varepsilon + \Delta\varepsilon)^2 - \varepsilon_0^2} \right]^{3/2} \times \frac{\varepsilon + \Delta\varepsilon}{\varepsilon} \left[\frac{\sqrt{(\varepsilon + \Delta\varepsilon)^2 - \varepsilon_0^2}}{\sqrt{(T_0 + \varepsilon_0)^2 - \varepsilon_0^2}} \right]^{-\gamma+1}, \quad (2)$$

где ε – полная энергия частиц; ε_0 – энергия покоя, T_0 – кинетическая энергия, при которой интенсивность КЛ соответствующей жесткости в Галактике равна A ; $\Delta\varepsilon$ – изменение энергии частиц в гелиосфере, определяемое выражением

$$\Delta\varepsilon = \begin{cases} \Delta\varepsilon_{pt} + \varepsilon - \sqrt{\beta(\varepsilon^2 - \varepsilon_0^2) + \varepsilon_0^2} + \varepsilon(1 - e^{\alpha/2}), & \text{если } R < R_0, \\ \Delta\varepsilon_{pt} - \varepsilon(R_0)(1 - e^{\alpha/2}), & \text{если } R > R_0. \end{cases}$$

Здесь $\Delta\varepsilon_{pt} = Z_c U$ (Z_c – заряд частицы, U – потенциал индуцированного электрического поля гелиосферы

$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \mathbf{u} \times \mathbf{B}$, c – скорость света, \mathbf{u} – скорость солнечного ветра (СВ), \mathbf{B} – напряженность межпланетного магнитного поля (ММП)); $\beta\infty = B/B_0$, B_0 – напряженность фонового, а \mathbf{B} – переменного во времени ММП, $\alpha = \frac{E_{pl}^2}{B^2}$, E_{pl} – напряженность поляризованного электрического поля, возникающего в гелиосфере при распространении пучков ускоренных частиц, R_0 – жесткость частиц, ларморовский радиус которых равен размерам областей с нестационарными электромагнитными полями, в которых происходит их ускорение. Вид первичного спектра (2) получен на основе физической модели модуляции КЛ за счет изменения их энергии в регулярных электромагнитных полях межпланетной среды различной природы.

Изменения ЖГО для каждой станции КЛ рассчитываются с учетом вариаций первичного спектра, полученного из выражения (2).

Результаты анализа

На рис. 1 представлены: модуль ММП, скорость СВ V [ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/omni2_2003.dat], изменения ЖГО (ΔR_C) при $R_C=3.66$ ГВ (Иркутск), $R_C=6.61$ ГВ (Алма-Ата) и $R_C=8.86$ ГВ (Пекин) соответственно, полученные при анализе методом СГС, а также D_{st} -индекс [ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/omni2_2003.dat]. На рис. 2 представлены более подробные графики ΔR_C для этих же пунктов наблюдения за 29–31 октября совместно с D_{st} -индексом. На рис. 3 представлены изменения ЖГО ΔR_C в зависимости от пороговых жесткостей R_C в отдельные моменты времени в октябре и ноябре 2003 г.

Обсуждение результатов и выводы

Как следует из графиков $\Delta R_{Ирк}$, $\Delta R_{А-Ата}$ и $\Delta R_{Пек}$, изменения ЖГО в Иркутске, Алма-Ате и Пекине для магнитной бури 29–31 октября имеют значительные различия. В Иркутске наиболее значительные понижения пороговой жесткости наблюдались в 15:00 UT (~ -2.9 ГВ, $D_{st}=-126$ нТл) и в 21:00 UT 29 октября (~ -2.9 ГВ, $D_{st}=-265$ нТл). Эти понижения ЖГО не совпадают по времени с локальными минимумами D_{st} -индекса, хотя временной ход $\Delta R_{Ирк}$ 30 октября соответствует временному поведению D_{st} -индекса. Обращают на себя внимание большие различия в значениях $\Delta R_{Ирк}$ при приблизительно одинаковых значениях D_{st} -индекса 30 октября. Так, например, в 00:00–01:00 UT 30 октября $\Delta R_{Ирк}=-0.5$ ГВ, $D_{st}=-363$ нТл, а в 22:00–23:00 UT 30 октября $\Delta R_{Ирк}=-1.9$ ГВ, $D_{st}=-342$ нТл.

В Алма-Ате (график $\Delta R_{А-Ата}$, рис. 1) в моменты первых двух значительных понижений ЖГО на среднеширотных станциях наблюдались понижения пороговых жесткостей на ~ -1.2 и ~ -1.5 ГВ соответственно, а максимальное понижение наблюдалось в главную фазу магнитной бури 30 октября ($\Delta R_C \sim -1.6$ ГВ, $D_{st}=-342$ нТл) за час до максимального понижения D_{st} -индекса (-401 нТл), т. е. в 22:00 UT. А в Пекине (график $\Delta R_{Пек}$, рис. 1) в вышеупомянутые моменты наблюдались понижения пороговых жесткостей на ~ -0.7 и ~ -1.2 ГВ соответственно, а максимальное понижение наблюдалось в главную фазу магнитной бури 30 октября ($\Delta R_C \sim -1.4$ ГВ, $D_{st}=-342$ нТл) так же, как и в Алма-Ате, за час до максимального понижения D_{st} -индекса.

Для события 20 ноября максимальное понижение ЖГО ($\Delta R_C \sim -1.2$ ГВ) в среднеширотных областях наблюдалось в главную фазу магнитной бури в 20:00 UT при $D_{st}=-472$ нТл, а в Алма-Ате и Пекине ($\Delta R_C \sim -1.1$ ГВ) – за час до этого при $D_{st}=-451$ нТл.

В зависимостях ΔR_C от пороговых жесткостей для 30 октября с 22:00 до 24:00 UT наблюдались уменьшение изменения ЖГО при высоких пороговых жесткостях и смещение максимума изменения ЖГО в сторону низких ЖГО (рис. 3).

В широтной зависимости ΔR_C для события 20 ноября 2003 г. максимальное понижение ЖГО на начальной стадии в 20:00 UT 20 ноября наблюдалось при $R_C \sim 2$ ГВ, затем к 24:00 UT этот максимум сместился к $R_C \sim 5$ ГВ. На рис. 3 на графике широтной зависимости ΔR_C для 20:00 UT 20.11.2003 г.

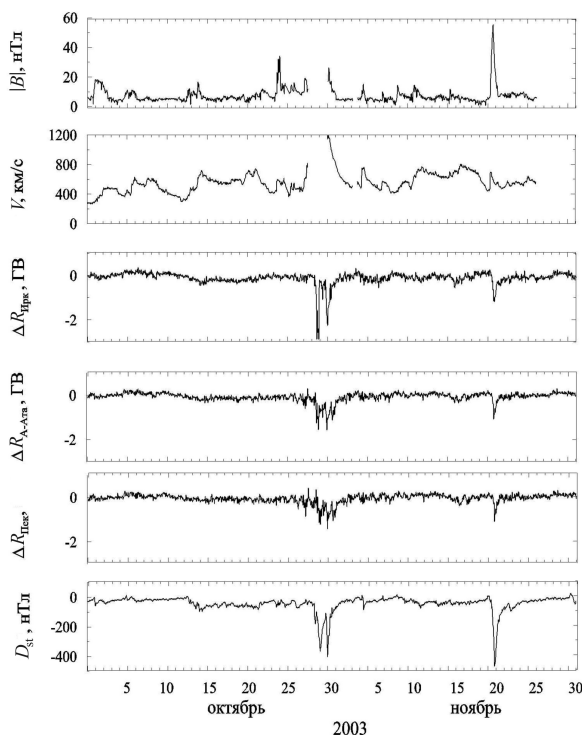


Рис. 1. Параметры межпланетной среды (модуль ММП, скорость СВ), временные профили изменений ЖГО в Иркутске, Алма-Ате и Пекине, а также D_{st} -индекс.

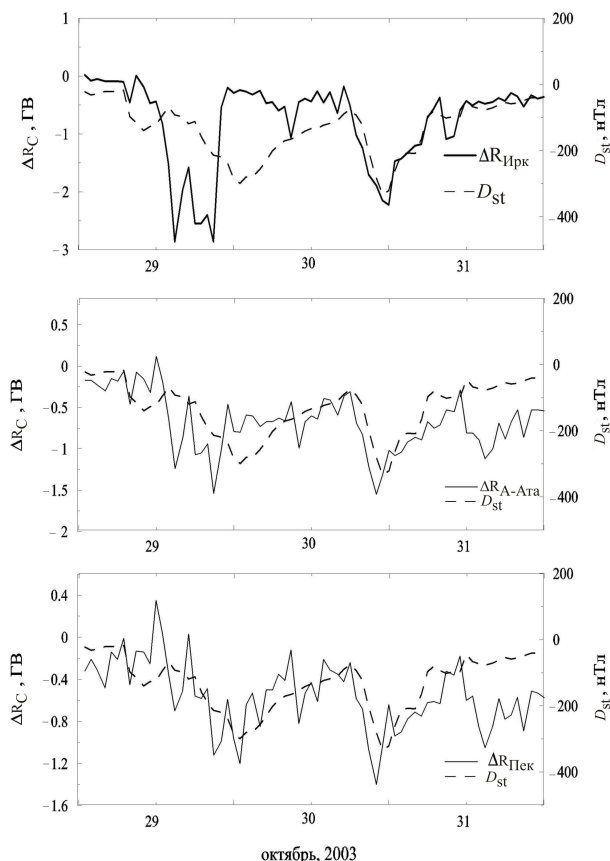


Рис. 2. Изменения ЖГО в Иркутске, Алма-Ате и Пекине в период геомагнитных возмущений 29–31 октября 2003 г. (сплошные линии) и D_{st} -индекс (штриховая линия).

треугольниками представлены результаты расчетов [Tyasto, et al., 2008] по модели магнитосферы Цыганенко [Tsyganenko, et al., 2003]. Видно, что эти расчеты удовлетворительно согласуются с результатами, по-

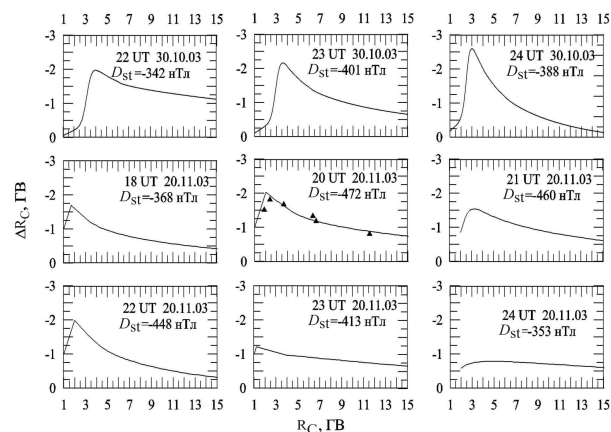


Рис. 3. Зависимость изменений ЖГО ΔR_C от пороговых жесткостей R_C в отдельные моменты возмущенного периода в октябре–ноябре 2003 г. Треугольники – результаты расчетов по модели Цыганенко [Tsyganenko, et al., 2003].

лученными по данным наземных наблюдений космических лучей на мировой сети станций.

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

Между временными профилями изменения ЖГО в Иркутске, Алма-Ате и Пекине имеются существенные различия.

В периоды магнитных бурь 29 октября 2003 г. наблюдались резкие изменения ЖГО, связанные, по-видимому, с токами на магнитопаузе, так как по данным GOES-10 в этот период магнитопауза смещалась до расстояний меньше 6.6 радиуса Земли [<http://kosmofizika.ru/buri/buri.htm>].

В октябре 2003 г. нет однозначной связи между временными профилями изменений ЖГО и D_{st} -индекса.

Результаты расчетов по модели магнитосферы Цыганенко удовлетворительно согласуются с результатами, полученными по данным наземных наблюдений космических лучей на мировой сети станций.

Полученные результаты могут быть использованы для тестирования различных моделей магнитосферных токовых систем и их динамики в периоды геомагнитных возмущений.

Данная работа поддержана программой Президиума РАН «Физика нейтрино и нейтринная астрофизика» в рамках проекта «Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным наблюдениям».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baisultanova L.M., Belov A.V., Dorman L.I., et al. Magnetospheric effects in cosmic rays during Forbush-decreases // Proc. 20th ICRC. Moscow, 1987. V. 4. P. 231–234.
- Belov A., et al. Geomagnetic effects on cosmic rays during the very strong magnetic storms in November 2003 and November 2004 // Proc. 29th ICRC. Pune, 2005. V. 2. P. 385–388.
- Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. A spectrographic global survey technique for studying cosmic ray distribution function and the planetary system geomagnetic cutoff rigidities // Proc. 23th ICRC. Calgary, 1993. V. 3. P. 797–800.
- Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Analyzing the solar proton event of October 22, 1989 using the method of spectrographic global survey // Solar Phys. 1998. V. 178, N 2. P. 405–422.
- Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy cosmic rays at the period of Forbush effect on the 12–25 July 1982 // IJGA. 2002. V. 3, N 3. P. 217–228.

Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Lukovnikova A.A., et al. Variations of parameters of rigidity spectrum of cosmic rays during events of January, 2005 // Proc. 30th ICRC. Merida, Mexico, 2007. V. 1. P. 127–130.

Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C. Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A5. P. 1209. doi:10.1029/2002JA009808.

Tyasto M.I., Danilova O.A., Dorman L.I., et al. On the possibility to check the magnetosphere's model by CR: the strong geomagnetic storm in November 2003 // Advances in Space Research. 2008. V. 42, Iss. 9. P. 1556–1563.

ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/omni_2003.dat

<http://kosmofizika.ru/buri/buri.htm>

<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск