

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.025

КОНТРОЛЬ ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПАРАМЕТРАМИ МАГНИТОСФЕРЫ И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ В НАЧАЛЕ СЕНТЯБРЯ 2017 Г.

О.А. Данилова¹, Н.Г. Птицына¹, М.И. Тясто¹, В.Е. Сдобнов²

¹Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН; e-mail: md1555@mail.ru

²Институт Солнечно-земной физики СО РАН

Аннотация. Космические лучи являются одним из важных факторов, определяющих космическую погоду. Их жесткости обрезания сильно изменяются под воздействием состояния магнитосферы Земли и межпланетного космического пространства. В данной работе представлены изменения геомагнитных порогов, рассчитанные для периода сильной геомагнитной бури 7–8 сентября 2017 г.. Модельные вертикальные эффективные геомагнитные пороги были получены методом траекторных расчетов в магнитном поле возмущенной магнитосферы (Цыганенко $Ts01$) для ряда станций. Проведено сравнение их с жесткостями обрезания, полученными методом спектрографической глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов. Проведен анализ временных вариаций геомагнитных порогов ΔR и корреляции их с параметрами межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ), которая различна на разных фазах бури и отличается от корреляции, посчитанной на масштабе всей бури. На главной фазе преобладает влияние ММП, в частности B_z компоненты, а на восстановительной фазе – динамических параметров СВ, а именно, давления P и плотности N . Это связано с тем, что во время бури в ответ на изменения параметров СВ и ММП развиваются глобальные токовые системы, которые эволюционируют во времени. При этом формирование, интенсификация и дальнейший распад этих токовых систем происходит не одновременно, а на различных временных масштабах.

1. Введение

Жесткость геомагнитного обрезания, или пороговая жесткость (R) космических лучей (КЛ), т.е. самая низкая жесткость, которой должна обладать частица, чтобы проникнуть в заданную точку в магнитосфере, определяется магнитосферным магнитным полем. Свойства геомагнитного экрана меняются во времени в зависимости от динамического взаимодействия магнитных и электрических полей солнечного ветра (СВ) с внутримангнитосферными полями и токами. Результаты предыдущих исследований зависимости порогов от межпланетных параметров и геомагнитной активности достаточно противоречивы.

Цель работы: Выявить параметры гелио- и магнитосферы, которые контролируют вариации пороговых жесткостей (ΔR) во время мощной бури 7 – 8 сентября 2017 г. при помощи расчета соответствующих корреляций.

Особое внимание мы уделили анализу корреляций изменений пороговых жесткостей с межпланетными параметрами и индексами геомагнитной активности во время каждой из трех фаз развития анализируемой бури: на предварительном этапе (перед бурей), в главной и восстановительной фазах бури, имея в виду, что контроль вариаций параметрами гелио- и магнитосферы на разных фазах магнитной бури очень мало изучен.

2. Данные и методы

Жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО) вычислялись с использованием двух методов:

(1) Методом спектрографической глобальной съемки [1], при которой определение ЖГО ($R_{\text{гс}}$) базируется на наблюдательных данных сети нейтронных мониторов;

(2) и методом, при котором для определения ЖГО ($R_{\text{эф}}$) численно рассчитываются траектории частиц в модельном магнитном поле магнитосферы [2]. В качестве модели выбрана эмпирическая модель магнитосферы Цыганенко $Ts01$ [3–5]. Выбор модели $Ts01$ для расчетов основан на том, что модель $Ts01$ хорошо описывает среднюю магнитосферу во время сильных возмущений.

Расчеты проводились для станций, расположенных на разных широтах: ESOI (33°.30 N, 35°.80 E), Алматы (43°.20 N, 76°.94 E), Рим (41°.90 N, 12°.52 E), Иркутск (52°.47 N, 104°.03 E), Москва (55°.47 N, 37°.32 E) и Кингстон (42°.99 S, 147°.29 E), пороговые жесткости которых в спокойное время охватывают область от ~10 до 2 ГВ. Вариации жесткости геомагнитного обрезания $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{гс}}$ определялись как разности между

рассчитанными значениями жесткости обрезания (теоретическими и экспериментальными) и жесткостями в спокойный период перед бурей (6 сентября 2017 г.).

Мы рассчитали корреляции вариаций пороговых жесткостей с изменениями общего межпланетного магнитного поля ММП B и его компонентами B_z и B_y , E_y — компонентой электрического поля, параметрами СВ: плотностью N , скоростью V и динамическим давлением P , а также с Kp и Dst индексами геомагнитной активности, значения которых были взяты из базы OMNI на сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.

3. Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов приведены на рисунках 1–3.

1) Понижение жесткостей обрезания во время бури 7–8 сентября 2017 г.

На рисунке 1 приведены некоторые параметры гео- и гелиосферы, а также $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ для двух высокоширотных станций Кингстон и Москва для 7–8 сентября 2017 г.

Как видно из рисунка 1, максимальное понижение геомагнитных порогов $\Delta R_{эф}$, полученных на основе модели, наблюдается на главной фазе, в максимуме бури, в то время как для $\Delta R_{сгс}$, полученных на основе данных наблюдений, — на восстановительной фазе.

Максимальное снижение геомагнитных порогов $\Delta R_{сгс}$ существенно меньше для наиболее высокоширотной станции Кингстон (~0.5 ГВ), чем для Москвы (~0.7 ГВ).

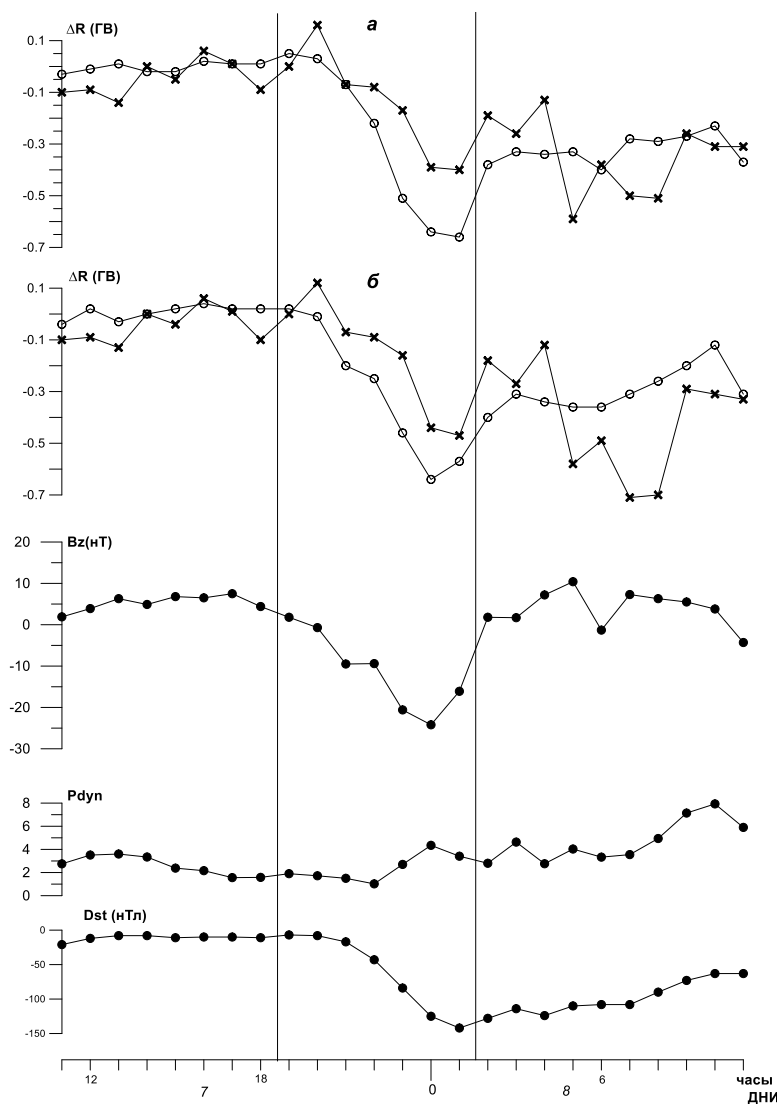


Рисунок 1. Временные изменения $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ ($\Delta R_{эф}$ — \circ , $\Delta R_{сгс}$ — \times ; а — Кингстон, б — Москва) и параметров B_z , P и Dst в течение бури.

2) Коэффициенты корреляции на масштабе всей бури. Сравнение результатов, полученных двумя методами.

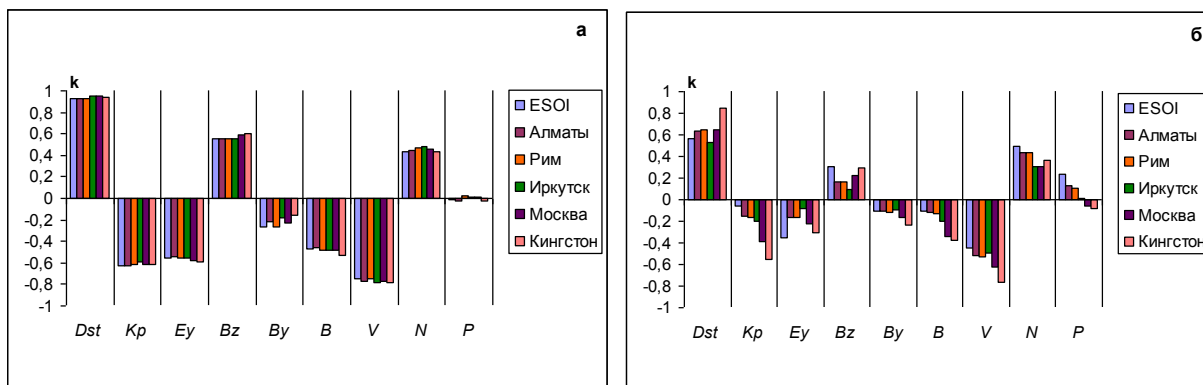


Рисунок 2. Корреляция параметров солнечного ветра и геомагнитной активности с вариациями модельной $\Delta R_{эф}$ (а) и наблюдательной $\Delta R_{сгс}$ (б) жесткости обрезания для 6 разноширотных станций КЛ.

Из рассмотрения рисунка 2 можно сделать следующие выводы:

а) Корреляция $\Delta R_{сгс}$ с параметрами СВ и магнитосферы сильно зависит от широты, в то время как для $\Delta R_{эф}$ широтный эффект практически не наблюдается.

б) Коэффициенты корреляции k для наблюдательных $\Delta R_{сгс}$ значительно меньше, чем для модельных $\Delta R_{эф}$.

в) Наиболее тесная связь как для $\Delta R_{эф}$, так и для $\Delta R_{сгс}$ обнаружена с Dst -индексом, для которого k лежит в пределах 0.80–0.95. Кроме того, для $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ видна существенная связь со скоростью СВ V .

г) Некоторая корреляция ΔR с магнитным и электрическим полем (B , Bz и Ey) видна только для $\Delta R_{эф}$.

По-видимому, модель $Ts01$, которая опирается на описание магнитосферных токовых систем, основанное на статистических данных о ~ 70 сильных бурях, недостаточно хорошо отражает пространственную конфигурацию возмущенной магнитосферы во время магнитной бури, в частности зависимости от широты для индивидуальных событий, по крайней мере, для бури 7–8 сентября 2017 г. [6].

3) Корреляции для $\Delta R_{эф}$ на разных фазах (ст. Москва).

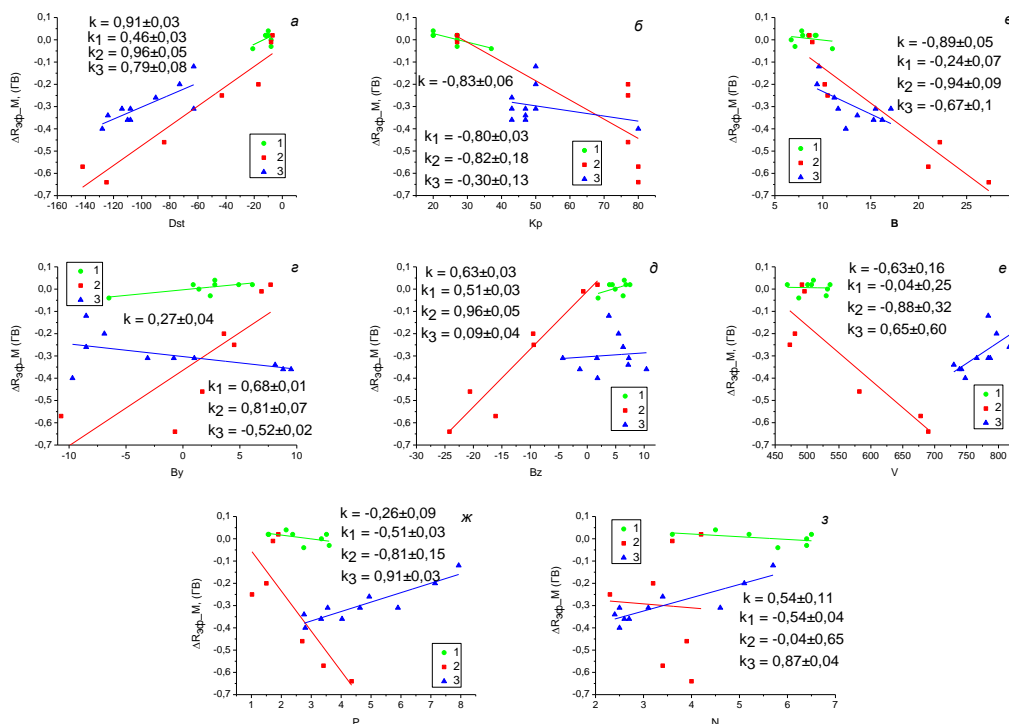


Рисунок 3. Коэффициенты корреляции между $\Delta R_{эф}$ и параметрами геомагнитной активности, ММП и СВ.

В этом параграфе мы провели анализ корреляций ΔR с межпланетными параметрами и индексами геомагнитной активности во время каждой из трех фаз бури — на предварительном этапе (1) (перед бурей — 7 сентября с 11:00 до 18:00 UT), в главной (2) (с 19:00 7 сентября до 01:00 8 сентября) и восстановительной (3) (с 02:00 до 11:00 UT 8 сентября) фазах.

Видно, что ситуация существенно меняется, если рассматривать корреляцию не на масштабе всей бури, а отдельно для разных фаз ее развития. Рисунок 3 демонстрирует, что для большинства панелей корреляционные тренды имеют противоположный знак на разных фазах, из-за чего коэффициент корреляции k на масштабе всей бури может быть очень низким. В частности, на рис. 3ж видно, что давление P , оказывает большое влияние на $\Delta R_{\text{эф}}$ на восстановительной ($k_3=0.91$) и главной ($k_2=-0.81$) фазах, но поскольку корреляция имеет противоположный знак, то для всей бури это влияние отсутствовало. На всех фазах бури Dst существенным образом контролирует вариации $\Delta R_{\text{эф}}$: $k_2=0.94$, и $k_3=0.79$. Это свидетельствует о том, что вариации геомагнитных порогов во время исследуемой очень интенсивной бури контролируются в основном кольцевым током. Кроме Dst наибольший вклад в $\Delta R_{\text{эф}}$ на главной фазе вносит ММП, а именно отрицательная компонента B_z ($k_2=0.96$) и общее поле B ($k_2=-0.94$), а на восстановительной — динамические параметры солнечного ветра P ($k_3=0.91$) и N ($k_3=0.87$). Вопрос о том, какая именно токовая система вносит преимущественный вклад в корреляционные соотношения между ΔR и исследуемыми параметрами в каждом конкретном периоде бури, требует дальнейших исследований.

4. Выводы и заключение

В данной работе двумя независимыми методами рассчитаны геомагнитные пороги $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{гс}}$ в период интенсивной геомагнитной бури 7–8 сентября 2017 г. и проведен анализ зависимости их изменений от параметров межпланетной среды и геомагнитосферы. Наш анализ позволил сделать следующие выводы:

1. Корреляция $\Delta R_{\text{гс}}$ с параметрами СВ и магнитосферы сильно зависит от широты, в то время как для $\Delta R_{\text{эф}}$ широтный эффект практически не наблюдается. Коэффициенты корреляции k для наблюдательных $\Delta R_{\text{гс}}$ значительно меньше, чем для модельных $\Delta R_{\text{эф}}$.

2. Наиболее сильная корреляция наблюдается между ΔR и Dst -индексом геомагнитной активности, что свидетельствует о том, что кольцевой ток играет главную роль в контроле вариаций жесткостей обрезания космических лучей во время этого сильного возмущения.

3. Чувствительность ΔR к динамическим и магнитным параметрам межпланетной среды различна на разных фазах бури и отличается от чувствительности, посчитанной на масштабе всей бури. На главной фазе превалирует влияние ММП, в частности B_z компоненты, а на восстановительной фазе преобладает влияние динамических параметров СВ, а именно, давления P и плотности N .

4. Специфический отклик жесткости геомагнитного обрезания на изменения параметров гелиосферы и магнитосферы на разных фазах магнитной бури, по-видимому, определяется различным относительным вкладом магнитосферных глобальных токовых систем в эти периоды. Различная чувствительность ΔR к параметрам СВ, ММП и геомагнитной активности на разных этапах магнитной бури связана с тем, что во время бури в ответ на изменения параметров СВ и ММП развиваются глобальные токовые системы (кольцевой ток вокруг Земли, токи на магнитопаузе, токи хвоста магнитосферы, токи в высоких широтах), которые эволюционируют во времени. При этом формирование, интенсификация и дальнейший распад этих токовых систем происходит не одномоментно, а на различных временных масштабах.

Знание корреляционных соотношений между вариациями жесткостей обрезания и параметрами СВ и геомагнитной активности во время сильных магнитных возмущений важно для учета последствий «плохой» космической погоды, для космонавтики и для бурно развивающихся в последние 15 лет высокоширотных авиаперевозок.

Литература

1. Dvornikov V.M. and Sdobnov V.E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy of cosmic rays at the period of Forbush effect on 12–25 July. // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 3. No. 3. P. 217–227. 2002.
2. Тясто М.И., Данилова О.А., Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Отражение параметров солнечного ветра в жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в период сильной магнитной бури в ноябре 2003г. // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 48. № 6. С. 723–740. 2008.
3. Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure. // J. Geophys. Res. V. 107. No. A8. P. 1179. 2002.
4. Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations. // J. Geophys. Res. V. 107. No. A8. P. 1176. 2002.
5. Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C. Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? // J. Geophys. Res. V. 108. No. A5. P. 1209. 2003.
6. Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Возмущенная магнитосфера 7–8 ноября 2004 г. и вариации жесткости обрезания космических лучей: широтные эффекты. // Солнечно–земная физика. Т. 6. № 3. С. 40–47. 2020.