

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. Данилова<sup>1</sup>, Н.Г. Птицына<sup>1</sup>, М.И. Тясто<sup>1</sup>, В.Е. Сдобнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН; e-mail: md1555@mail.ru

<sup>2</sup>Институт 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  $\Delta R$  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 ( $\Delta R$ ) 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).

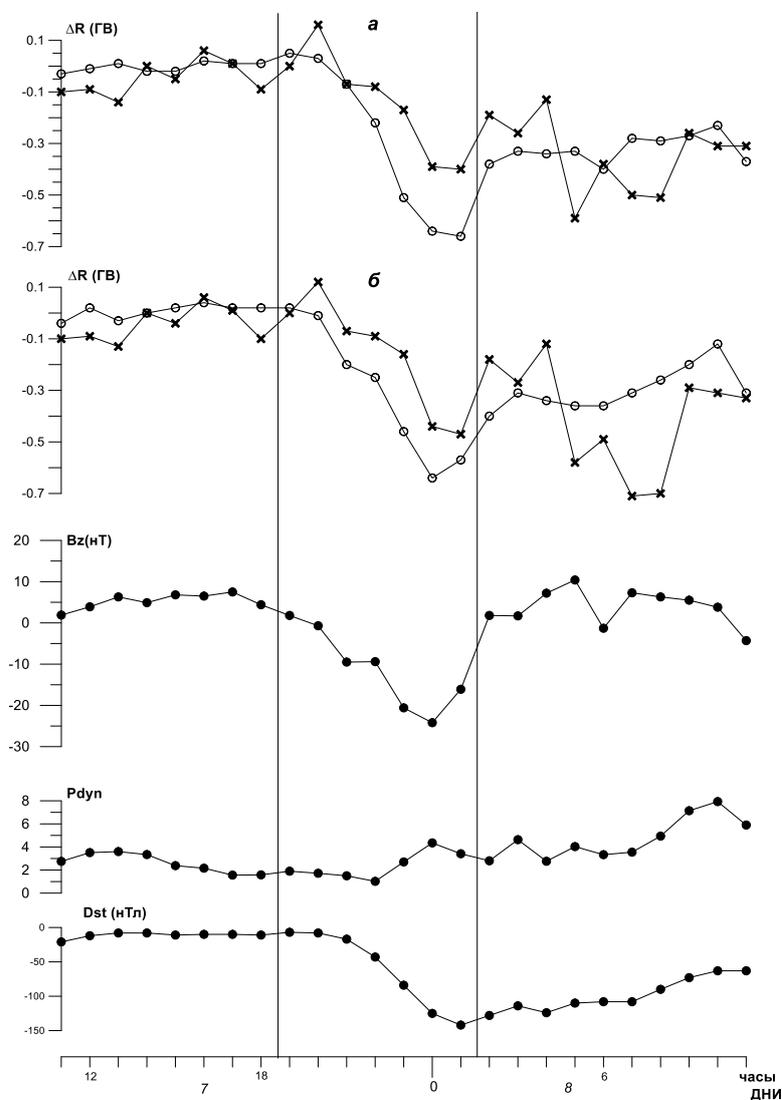
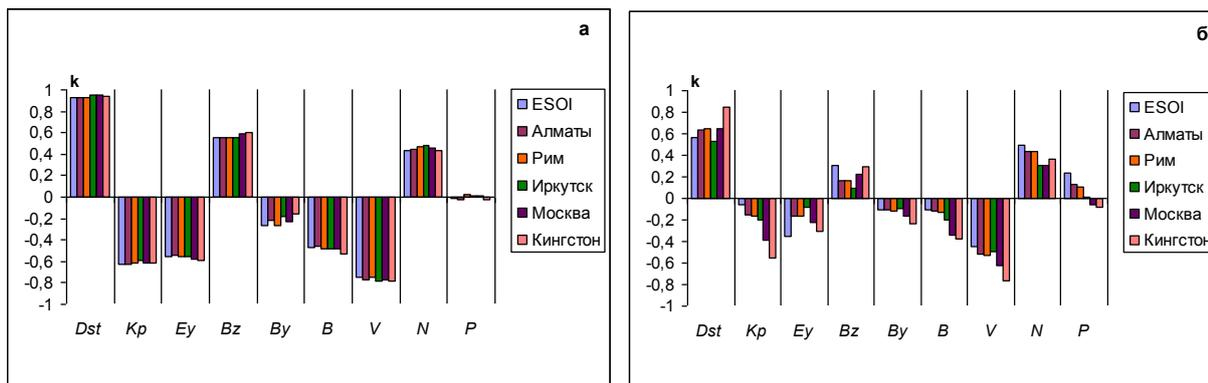


Рисунок 1. Временные изменения  $\Delta R_{эф}$  и  $\Delta R_{сгс}$  ( $\Delta R_{эф}$  —  $\circ$ ,  $\Delta R_{сгс}$  —  $\times$ ; а — Кингстон, б — Москва) и параметров  $B_z$ ,  $P$  и  $Dst$  в течение бури.

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.

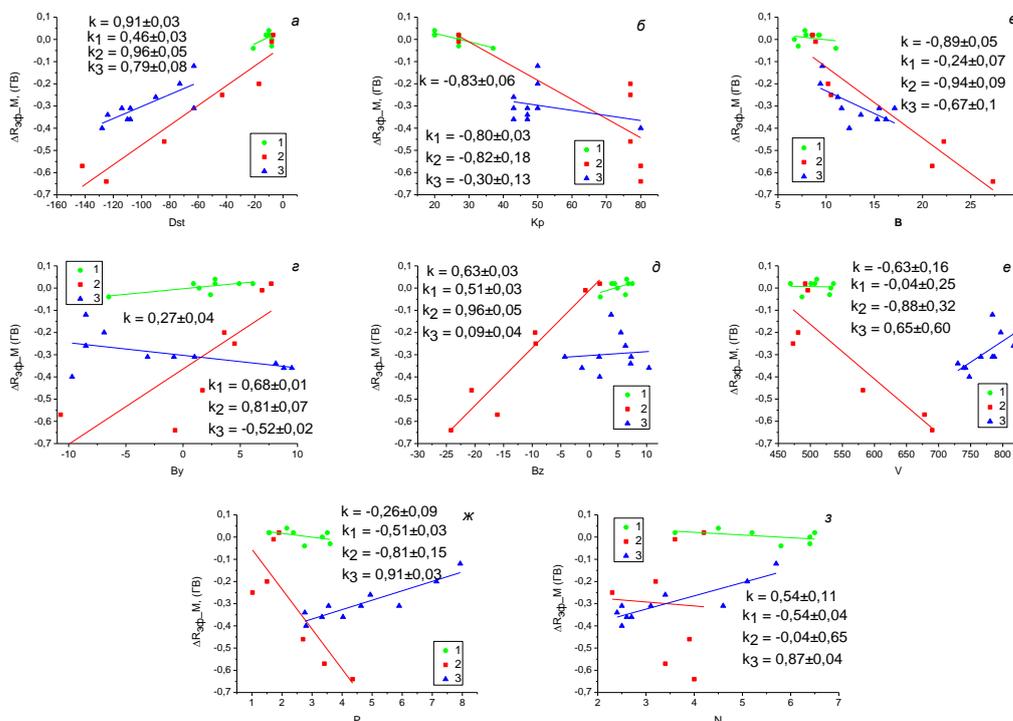
б) Коэффициенты корреляции  $k$  для наблюдательных  $\Delta R_{сгс}$  значительно меньше, чем для модельных  $\Delta R_{эф}$ .

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  $\Delta R$  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  $\sim 70$  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  $\Delta R$  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  $\Delta R$  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  $\Delta R$  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  $\Delta R$  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  $\Delta R$  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.