

**ОТКЛИК ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ИЗМЕНЕНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ  
ВО ВРЕМЯ БУРИ 23–24 МАРТА 2023 Г.**

**Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И.**

*Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия*

**RESPONSE OF THE CUTOFF RIGIDITY OF COSMIC RAYS TO  
CHANGES IN THE DYNAMIC AND MAGNETIC PARAMETERS OF  
THE SOLAR WIND AND GEOMAGNETIC ACTIVITY DURING  
THE STORM ON MARCH 23–24, 2023**

**Ptitsyna N.G., Danilova O.A., Tyasto M.I.**

*St-Petersburg Filial of IZMIRAN, St. Petersburg, Russia*

*We investigated the correlations between the cutoff rigidity of cosmic rays and the parameters of interplanetary space, solar wind, and geomagnetic activity during a strong magnetic storm on March 23–24, 2023. The cutoff rigidity of cosmic rays was obtained by calculating the trajectories of particles in the magnetic field of the magnetosphere according to the Tsyganenko Ts01 model. The analysis showed that the changes in the cutoff rigidity is controlled mainly by changes in the indices of geomagnetic activity  $Dst$  (correlation coefficient  $k \approx 0.95$ ), as well as electromagnetic parameters  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  and plasma  $\beta$  ( $|k| \approx 0.6–0.75$ ). The dynamic parameters of the solar wind  $V$ ,  $N$ ,  $P$  have little effect on the dynamics of the cosmic ray cutoff rigidity ( $|k| < 0.45$ ).*

**<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-249-252>**

## **1. Введение**

Проникновение потоков космических лучей (КЛ) в магнитосферу и атмосферу Земли контролируется магнитным полем Земли, которое является экраном для заряженных частиц. Возможность проникновения заряженных частиц внутрь магнитосферы определяется их магнитной жесткостью  $R$  (момент на единицу заряда). Жесткость геомагнитного обрезания /геомагнитный порог КЛ – это жесткость, ниже которой поток частиц отсекается из-за геомагнитного экранирования. Во время магнитных бурь в магнитосфере формируются глобальные системы токов: кольцевой ток, ток на магнитопаузе, магнитосферный хвостовые токи, а также высокоширотные продольные токи. Эти токи снижают напряженность поля внутри магнитосферы, тем самым ослабляя геомагнитное экранирование, т.е. наблюдаются вариации жесткости обрезания  $\Delta R_{\text{эф}}$ . Целью данного исследования является определение геомагнитных порогов в период сильной магнитной бури 23–24 марта 2023 г. и анализ зависимости их изменений от параметров межпланетной среды и геомагнитосферы.

## 2. Метод и данные

Вертикальные эффективные геомагнитные пороги  $R_{эф}$  численно рассчитаны для 23–24 марта 2023 г. через определение траекторий частиц в модельном магнитном поле модели Цыганенко  $Ts01$  ([1] и ссылки там). Расчеты проводились для каждого часа по отношению к средним жесткостям в спокойное время 12 марта 2023 г для следующих станций: ESOI ( $33.30^\circ$  N,  $35.80^\circ$  E), Афины ( $37.97^\circ$  N,  $23.72^\circ$  E), Алматы ( $43.25^\circ$  N,  $76.92^\circ$  E), Юнгфрау ( $46.55^\circ$  N,  $7.98^\circ$  E), Иркутск ( $52.47^\circ$  N,  $104.03^\circ$  E), Москва ( $55.47^\circ$  N,  $37.32^\circ$  E) и Кингстон ( $42.99^\circ$  S,  $147.29^\circ$  E). Далее вычислялись коэффициенты корреляции  $k$  вариаций жесткостей обрезания  $\Delta R_{эф}$  со следующими параметрами: компоненты  $B_z$  и  $B_y$ , и полное значение ММП  $B$ , азимутальная компонента  $E_y$  электрического поля, параметр плазмы  $\beta$ , скорость  $V$ , плотность  $N$  и давление  $P$  СВ, а также индексы геомагнитной активности  $Dst$  и  $Kp$  (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

## 3. Результаты

На верхней панели рис. 1 показаны вариации геомагнитных порогов  $\Delta R_{эф}$  для всех исследуемых станций во время бури 23–24 сентября 2023 г. Видно, что максимальное понижение порогов до  $\approx -0.8$  ГВ наблюдается на высокоширотных станциях Москва и Кингстон в 02:00 UT 24 марта во время пика бури (минимум  $Dst$ ). Кроме того, на всех станциях КЛ виден отрицательный скачок  $\Delta R_{эф}$  от 0 до  $-0.5$  ГВ в начале бури (13:00 UT 23 марта). При этом максимальное понижение  $\Delta R_{эф} \approx -0.5$  ГВ наблюдается для станции Москва. Это понижение жесткостей обрезания в начале главной фазы было значительным и составило  $\sim 70\%$  от максимального понижения в минимуме  $Dst$ , т.е. в конце главной фазы. Понижение жесткостей обрезания на начальном этапе главной фазы бури является откликом на большой скачок динамического давления  $P = 14.79$  нПа в 12:00 UT, что свидетельствует о резком сжатии магнитосферы.

На диаграмме рис. 2 представлены результаты вычислений коэффициентов корреляций между  $\Delta R_{эф}$  для выбранных станций и параметрами геомагнитной активности, солнечного ветра и ММП. Видно, что, что наилучшая корреляция  $\Delta R_{эф}$  прослеживается с  $Dst$  ( $k \approx 0.93-0.96$ ). Отрицательная корреляция с геомагнитным индексом  $Kp$  несколько меньше ( $k \approx -0.74 \div -0.8$ ). Кроме того, значительная корреляция/антикорреляция найдена для всех электромагнитных параметров, кроме  $B_y$ :  $B$  ( $k \approx -0.68 \div -0.74$ ),  $B_z$  ( $k \approx 0.59 \div 0.7$ ),  $E_y$  ( $k \approx -0.57 \div -0.68$ ) и  $\beta$  ( $k \approx 0.57 \div 0.71$ ).

Динамические параметры солнечного ветра показывают значительно меньшую связь со значениями  $\Delta R_{эф}$ :  $k \leq 0.5$  на всех станциях (рис. 2).

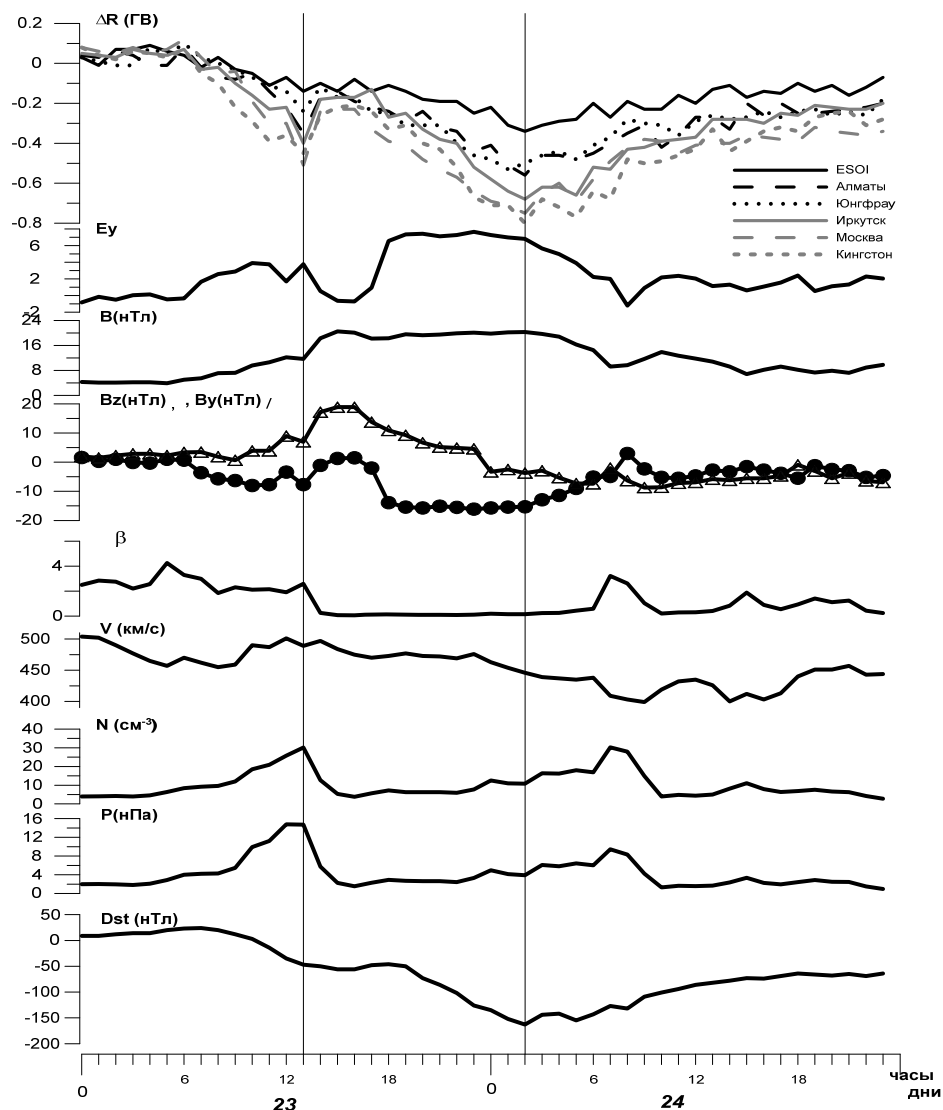


Рис. 1. Вариации жесткости геомагнитного обрезания и некоторых параметров солнечного ветра, ММП и геомагнитной активности во время бури 23–24 марта 2023 г.

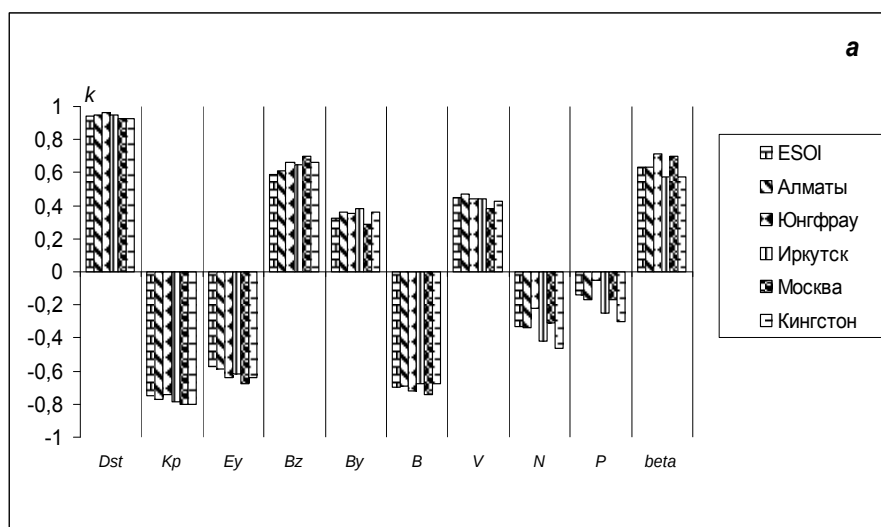


Рис. 2. Корреляция между  $\Delta R_{эф}$  и исследуемыми параметрами.

#### **4. Выводы и заключение**

Мы проследили, как изменяющиеся условия в СВ и магнитосфере в процессе эволюции магнитной бури 23–24 марта 2023 г. отражаются на поведении изменений жесткостей геомагнитного обрезания КЛ  $\Delta R_{\text{эф}}$ . Получено, что наибольшее понижение жесткостей обрезания КЛ наблюдается на главной фазе в максимуме бури ( $Dst = -167$  нТл) и составляет  $\Delta R_{\text{эф}} = -0.8$  ГВ (на ст. Москва). Кроме того, значительное понижение  $\Delta R_{\text{эф}} = -0.5$  ГВ фиксируется в начале бури как реакция на скачкообразное повышение давления СВ  $P$ , которое обусловило сжатие магнитосферы и начало главной фазы бури. Величина  $\Delta R$  и его направление контролируются относительным вкладом токов на магнитопаузе и кольцевого тока, воздействие которых противоположно [2]. В случае исследуемой бури преимущественное воздействие на движение частиц КЛ сразу после скачкообразного повышения  $P$  оказывали эффекты интенсификации кольцевого тока. Наибольшая степень корреляции значений  $\Delta R_{\text{эф}}$  была с  $Dst$  ( $k \approx 0.96$ ), что свидетельствует о том, что кольцевой ток действительно играет основную роль в контроле  $\Delta R_{\text{эф}}$ . Кроме того, выявлена высокая степень корреляции с электромагнитными параметрами  $B$ ,  $B_z$ ,  $\beta$  и  $E_y$ . Динамические параметры СВ не обнаруживают существенной связи со значениями  $\Delta R_{\text{эф}}$  во время эволюции бури.

Можно заключить, что доминирующим фактором изменений жесткостей геомагнитного обрезания во время бури 23–24 марта 2023 г. является кольцевой ток, а суммарный эффект остальных токовых систем определяет полученные корреляции. Однако определить вклад отдельных токовых систем не представляется возможным, так как динамика жесткости геомагнитного обрезания в зависимости от параметров СВ и ММП тесно связана с еще недостаточно хорошо понятой динамикой взаимодействия СВ и магнитосферы во время сильной магнитной бури.

#### **Литература**

1. *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, vol. 108, iss. A5, 1209. DOI: 10.1029/2002JA009808.
2. *Flueckiger E.O., Shea M.A., Smart D.F.* On the latitude dependence of cosmic ray cutoff rigidity variations during the initial phase of a geomagnetic storm / *Proc. 20<sup>th</sup> Int. Conf. Cosmic Rays. Moscow, 1987*, vol. 4, pp. 2016–2020.