

**ГЕОМАГНИТНОЕ ОБРЕЗАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 23–24 МАРТА 2023 Г:
СВЯЗЬ С ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ С УЧЕТОМ ШИРОТНЫХ ЭФФЕКТОВ**

**GEOMAGNETIC CUTOFF OF COSMIC RAYS DURING
THE MARCH 23–24, 2023 MAGNETIC STORM:
RELATIONSHIP WITH SOLAR WIND PARAMETERS
AND GEOMAGNETIC ACTIVITY TAKING INTO ACCOUNT LATITUDINAL EFFECTS**

О.А. Данилова

*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Санкт-Петербург, Россия, md1555@mail.ru*

Н.Г. Птицына[†]

*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Санкт-Петербург, Россия*

В.Е. Сдобнов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sдобнов@mail.ru*

O.A. Danilova

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, St. Petersburg Branch RAS, St. Petersburg, Russia, md1555@mail.ru

N.G. Ptitsyna[†]

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, St. Petersburg Branch RAS, St. Petersburg, Russia

V.E. Sdobnov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, sдобнов@mail.ru

Аннотация. В данной работе жесткости геомагнитного обрезания (геомагнитные пороги) во время сильной магнитной бури 23–24 марта 2023 г. были рассчитаны 1) методом спектрографической глобальной съемки по наблюдательным данным регистрации космических лучей мировой сетью станций ($R_{\text{сгс}}$); 2) численно траекторными расчетами в модельном магнитном поле магнитосферы ($R_{\text{эфф}}$). Жесткость геомагнитного обрезания определялась для девяти разноширотных станций космических лучей. Были рассчитаны корреляции вариаций геомагнитных порогов $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эфф}}$ с электромагнитными и динамическими параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности Dst и K_p . Выявлено, что геомагнитные пороги, вычисленные двумя методами, наиболее сильно коррелируют с Dst и электромагнитными параметрами солнечного ветра. Сколько-нибудь существенной корреляции с динамическими параметрами не наблюдается. Анализ показал, что реакция $\Delta R_{\text{сгс}}$ на контролируемые магнитные параметры и Dst меняется с широтой станции наблюдения: корреляция достигает наибольших значений на средних широтах и значительно падает к экватору. Корреляции $\Delta R_{\text{эфф}}$, вычисленные с помощью модели, не показывают широтной зависимости.

Ключевые слова: космические лучи, геомагнитные пороги, жесткость геомагнитного обрезания, межпланетное магнитное поле, индексы геомагнитной активности.

Abstract. In this paper, we calculate geomagnetic cutoff rigidities during the strong magnetic storm of March 23–24, 2023, using 1) the spectrographic global survey method based on observational data from cosmic ray recording by the global network of stations (R_{sgs}); 2) numerical trajectory calculations in a model magnetic field of the magnetosphere (R_{eff}). The geomagnetic cutoff rigidity has been determined for nine cosmic ray stations at different latitudes. We calculated the correlations of the variations in the geomagnetic cutoff rigidity ΔR_{sgs} and ΔR_{eff} with magnetic and dynamic solar wind parameters and the geomagnetic activity indices Dst and K_p . It has been found that the geomagnetic cutoff rigidity calculated by both methods correlate most strongly with Dst and the electromagnetic parameters of the solar wind. No significant correlation with the dynamic parameters was observed. The analysis has shown that the response of ΔR_{sgs} to the controlling magnetic parameters and Dst changes with latitude of the observation station: the correlation reaches its highest values at midlatitudes and drops significantly toward the equator. The correlations of ΔR_{eff} calculated by the model do not reveal a latitudinal dependence.

Keywords: cosmic rays, geomagnetic threshold, cosmic ray cutoff rigidity, interplanetary magnetic field, geomagnetic activity.

ВВЕДЕНИЕ

Под действием геомагнитного поля заряженные частицы галактических космических лучей (КЛ) меняют свою траекторию. Часть из них с жесткостью ниже характерного для пункта их измерения порогового значения (жесткость геомагнитного обрезания, R_c) не доходит до земной поверхности. Из-за экранирующего характера магнитного поля Земли на экватор проникает существенно меньше частиц, чем на высокие широты. Вариации потоков КЛ в магнитосфере во время магнитных бурь обусловлены изменениями жесткости ΔR геомагнитного обрезания / геомагнитных порогов КЛ. Пороги зависят от экранирующих свойств магнитного поля Земли.

Во время магнитной бури энергию солнечного ветра (СВ) в магнитосферу Земли передают выбросы корональной солнечной массы (СМЕ, Coronal Mass Ejection) или высокоскоростные коротирующие области взаимодействия (CIR, Corotating Interaction Region) из корональных дыр. Поступление энергии, генерированной во время повышенной активности Солнца, и ее последующее затухание в магнитосфере определяет эволюцию геомагнитной бури, которая описывается различными геомагнитными индексами. Индекс K_p — планетарный индекс, характеризующий глобальную возмущенность магнитного поля Земли в трехчасовом интервале времени, — определяется как среднее значение уровней возмущения двух горизонтальных компонент геомагнитного поля, наблюдаемых в 13 отобранных магнитных обсерваториях, расположенных в субавроральной зоне между 48° и 63° северной и южной геомагнитных широт. Другим широко используемым является так называемый буревой индекс Dst , который вычисляется как среднечасовое возмущение горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля в четырех низкоширотных магнитных обсерваториях. Он представляет собой меру изменения магнитного поля системы токов, текущих вдоль поверхности магнитосферы Земли (DCF, Magnetopause Current System) и кольцевым током (DR, Ring Current) западного направления. В результате развития системы токов во время геомагнитного возмущения магнитное поле магнитосферы уменьшается, в соответствии с этим уменьшается геомагнитное экранирование, что облегчает проникновение КЛ в более низкие широты. В свою очередь, динамика токовых систем зависит от динамики магнитных и динамических параметров околоземного пространства.

Знание зависимостей ΔR от параметров СВ и магнитосферы может прояснить важные черты взаимодействия СВ с магнитосферой и сопутствующие этому взаимодействию геомагнитные эффекты, которые управляют транспортировкой КЛ через магнитосферу и атмосферу во время возмущений. Изучение широтных эффектов этого взаимодействия важно с точки зрения обеспечения безопасности экипажа и пассажиров космических полетов, а также высокоширотной и высотной авиации [Буров и др., 2005; Iucci et al., 2005].

Отклик геомагнитного экранирования на изменения геомагнитной обстановки в СВ и межпланет-

ном магнитном поле (ММП) во время магнитных бурь изучался в [Kanekal et al., 1998; Leske et al., 2001; Shimazu, 2009; Tyssøy, Stadsnes, 2014; Adriani et al., 2016] теоретически и экспериментально. Однако однозначного ответа на вопрос о том, какие параметры ближнего космоса контролируют транспортировку КЛ во время возмущений, не было найдено. Для ответа необходимо как минимум наличие достаточно обширной базы соответствующих данных для геомагнитных бурь различного типа и интенсивности, вызванных разными источниками на Солнце и в межпланетном пространстве, произошедших на разных фазах солнечного цикла. На основе этих данных можно было бы получить обобщенные выводы об изменении геомагнитного экранирования во время межпланетных и геомагнитных возмущений различного характера. Ранее в [Птицына и др., 2019; Данилова и др., 2023 и ссылки там] для одной умеренной и семи сильных геомагнитных бурь 23-го и 24-го циклов солнечной активности мы вычислили жесткости геомагнитного обрезания и их корреляции с параметрами гелио- и геосферы. Большинство рассмотренных бурь было зафиксировано на фазах спада и в минимуме циклов. В данной работе для дальнейшего расширения нашего архива данных рассмотрена сильная буря в марте 2023 г. вблизи максимума 25-го цикла, вызванная специфическим скрытым СМЕ. Кроме того, мы добавили в наше исследование расчет и анализ данных для трех дополнительных низкоширотных станций КЛ, имея в виду поиск широтных эффектов. Цель данной работы — определение геомагнитных порогов двумя независимыми методами $R_{эфф}$ и $R_{сгс}$ в период сильной бури 23–24 марта 2023 г., анализ зависимости их изменений от параметров межпланетной среды и геомагнитосферы с фокусом на широтные эффекты, а также сравнение результатов, полученных разными методами. Для решения поставленных задач были рассчитаны корреляции вариаций жесткостей геомагнитного обрезания $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эфф}$ с электромагнитными и динамическими параметрами СВ, Dst и K_p .

1. МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Для расчетов жесткости геомагнитного обрезания во время сильной магнитной бури 23–24 марта 2023 г. были использованы метод спектрографической глобальной съемки (СГС) и метод прослеживания траекторий частиц КЛ в модельном магнитном поле.

В основе метода СГС лежит предположение, что вариации потока КЛ на земной поверхности определяются спектром жесткости, питч-угловым распределением частиц в межпланетном пространстве и градиентом плотности частиц на ларморовском радиусе [Kovalev et al., 2022]. Этот метод позволяет по наземным наблюдениям КЛ на мировой сети станций получать информацию о распределении первичных КЛ по энергиям и питч-углам в межпланетном пространстве, а также об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый момент наблюдений ($R_{сгс}$).

Таблица 1

Стандартные ошибки определяемых методом СГС параметров ММП, КЛ, земной магнитосферы и атмосферы в зависимости от точности данных нейтронного монитора и мюонного телескопа [Kovalev et al., 2022]

| $I_{\text{нм}}, \%$ | $I_{\text{мт}}, \%$ | $\lambda, \text{град}$ | $\Psi, \text{град}$ | $A_0, \%$ | $A_1, \%$ | $A_2, \%$ | $\Delta R_c, \text{ГВ}$ | $T_{\text{ПС}}, \text{°C}$ | $T_{\text{СМ}}, \text{°C}$ |
|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| ± 0.1 | ± 0.1 | ± 16.9 | ± 21.5 | ± 1.0 | ± 8.8 | ± 1.7 | ± 0.03 | ± 1.3 | ± 0.3 |
| | ± 0.2 | ± 16.9 | ± 21.5 | ± 1.0 | ± 8.8 | ± 1.7 | ± 0.03 | ± 2.5 | ± 1.2 |
| ± 0.15 | ± 0.1 | ± 17.0 | ± 21.8 | ± 1.3 | ± 8.8 | ± 1.7 | ± 0.04 | ± 1.3 | ± 0.3 |
| | ± 0.2 | ± 17.0 | ± 21.8 | ± 1.3 | ± 8.8 | ± 1.7 | ± 0.04 | ± 2.5 | ± 1.0 |
| ± 0.2 | ± 0.1 | ± 17.5 | ± 22.1 | ± 1.6 | ± 8.9 | ± 1.8 | ± 0.05 | ± 1.3 | ± 0.3 |

В табл. 1 показаны стандартные ошибки определения методом СГС долготного λ и широтного Ψ углов ММП, дифференциального жесткостного спектра A_0 , амплитуд питч-угловой анизотропии A_1 и A_2 КЛ, изменения жесткости геомагнитного обрезания ΔR_c , приземной $\Delta T_{\text{ПС}}$ и среднемассовой $\Delta T_{\text{СМ}}$ температуры атмосферы в зависимости от точности измерений нейтронной $I_{\text{нм}}$ и заряженной $I_{\text{мт}}$ компонент КЛ.

Видно, что статистическая ошибка в определении $\Delta R_{\text{сгс}}$ с учетом точности измерений на станциях КЛ не превышает по абсолютной величине 0.05 ГВ. Вариации жесткостей геомагнитного обрезания, полученные этим методом, далее называются наблюдательными.

Второй метод — способ, при котором R_c вычисляется траекторными расчетами [Shea et al., 1965] в модельном магнитном поле магнитосферы ($R_{\text{эфф}}$). В данной работе для расчетов эффективных геомагнитных порогов $R_{\text{эфф}}$ была использована модель Цыганенко Ts01 ([Tsyanenko et al., 2003] и ссылки там). При этом точность определения геомагнитных порогов зависит от точности магнитосферной модели, используемой при расчетах. Согласно модели Ts01, магнитное поле внутри магнитосферы (без главного магнитного поля) представляет собой сумму вкладов от основных магнитосферных токовых систем. При параметризации токовых систем использовались спутниковые данные, измеренные во время 37 геомагнитных бурь с $Dst \leq -65$ нТл [Tsyanenko et al., 2003]. Модель Ts01 включает в себя токи Чепмена—Ферраро, симметричный и частичный объемные круговые токи, поперечные токи хвоста и крупномасштабные продольные токи. В [Tuasto et al., 2012] показано, что во время сильных магнитных бурь модель магнитосферы Ts01 лучше описывает ситуацию в магнитосфере, чем модель Ts04. Для расчетов магнитного поля от внутренних источников используется представление главного магнитного поля Земли (ГМПЗ) в виде разложения в ряд по сферическим гармоническим функциям до $n=10$. Вариации жесткостей геомагнитного обрезания, полученные этим методом, далее называются модельными.

Жесткости геомагнитного обрезания определялись для девяти разноширотных станций КЛ, представленных в табл. 2. Станции выбирались таким образом, чтобы в спокойное время они охватывали ос-

новную область пороговых R_c , подверженных влиянию геомагнитного поля.

Далее вычислялись коэффициенты корреляции k и стандартные ошибки s между $\Delta R_{\text{эфф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ со следующими параметрами: полное значение ММП B и его компоненты B_z и B_y , азимутальная компонента E_y электрического поля, параметр плазмы β , скорость V , плотность N и давление P СВ, а также Dst и K_p . Эти параметры доступны в базе OMNI [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>].

Плазменное β — это отношение давления плазмы к магнитному давлению; в базе OMNI этот параметр рассчитывается по формуле

$$\beta = (4.16T/10^5 + 5.34)N_p/B^2,$$

где T — температура (К); N_p — плотность протонов (см^{-3}); B — полное магнитное поле (нТл).

Электрическое поле вычислялось по формуле

$$E = -VB_z 10^{-3},$$

где E — электрическое поле (мВ/м); V — скорость протонов (км/с); B_z — компонента магнитного поля (нТл).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Параметры гелио-, геосферы и жесткость обрезания КЛ во время бури 23–24 марта 2023 г.

На рис. 1 сверху вниз показаны электромагнитные и динамические параметры СВ и геомагнитной активности во время геомагнитной бури 23–24 марта 2023 г.: $B, B_z, E_y, \beta, V, N, P$ СВ, а также K_p и Dst .

Особенностью исследуемой бури было то, что она вызвана скрытым (stealth) СМЕ. Такие СМЕ не связаны с какими-либо видимыми проявлениями на Солнце, поэтому их сложно идентифицировать и соответственно предсказать их геоэффективность. В частности, СМЕ, который инициировал изучаемую геомагнитную бурю, не был замечен никем из наблюдателей и не был внесен в каталоги. Но поскольку пиковое значение бурового индекса неожиданно достигло $Dst = -163$ нТл, буря была квалифицирована как сильная [Tahir et al., 2024; Teng et al., 2024].

Видно, что 23 марта в $\sim 8:00-14:00$ UT B, N, P , а также B_z постепенно растут, что можно интерпретировать как прохождение около Земли оболочки меж-

Таблица 2

Станции космических лучей

| Название станции | Международный код | Географическая широта | Географическая долгота | R_c |
|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|-------|
| Кингстон | KGSN | 42.99° S | 147.29° E | 1.9 |
| Москва | MOSC | 55.47° N | 37.32° E | 2.08 |
| Новосибирск | NVBK | 54.80° N | 83.00° E | 2.32 |
| Иркутск | IRKT | 52.47° N | 104.03° E | 3.13 |
| Юнгфрау | JUNG | 46.55° N | 7.98° E | 4.51 |
| Алматы | AATB | 43.25° N | 76.92° E | 5.21 |
| Рим | ROME | 41.90° N | 12.52° E | 6.11 |
| Афины | ATHN | 37.97° N | 23.72° E | 8.48 |
| Emilio Segre Obs. | ESOI | 33.30° N | 35.80° E | 10.73 |

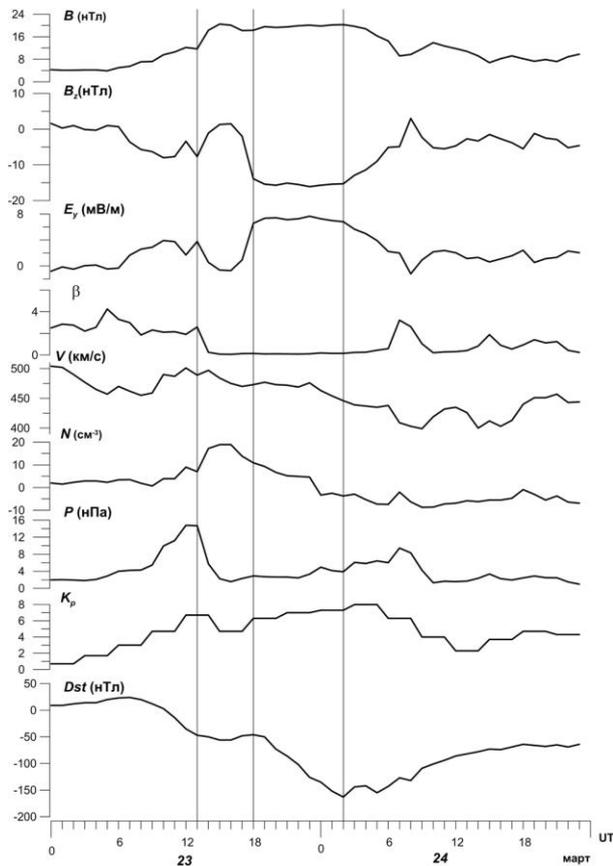


Рис. 1. Параметры СВ, ММП и геомагнитной активности во время бури 23–24 марта 2023 г. Вертикальные линии указывают главную фазу бури, а также начало активной стадии главной фазы в ~18:00 UT 23 марта

планетного CME (ICME sheath) или области сжатия перед ICME.

Можно считать, что главная фаза бури началась в ~13:00 UT с резкого сжатия магнитосферы после скачка P до 14.8 нПа. С началом главной фазы β уменьшилось скачком от фонового $\beta \approx 2$ перед бурей до $\beta \approx 0.2$ и оставалось таким на всей главной фазе бури. Такое низкое значение β может быть связано

с повышенной турбулентностью плазмы и служить триггером магнитной бури [Куражковская и др., 2021]. Компонента B_z колебалась между ориентацией на юг и на север, прежде чем окончательно повернуть на юг в ~18:00 UT. В это время началась активная стадия бури, когда Dst начинает резко понижаться и достигает минимума $Dst = -163$ нТл в 02:00 UT 24 марта 2023 г. После этого Dst стал увеличиваться, B_z тоже начала расти и магнитная буря перешла в фазу релаксации.

На рис. 2, $a-e$ показаны рассчитанные вариации геомагнитных порогов $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эфф}$ для всех исследуемых станций. На панели $ж$ показан также ход Dst для иллюстрации связи динамики геомагнитных порогов и эволюции бури. Видно, что ход кривых $\Delta R_{эфф}$ и $\Delta R_{сгс}$ в целом обнаруживает удовлетворительное согласие с Dst .

Видна четкая зависимость понижения порогов $\Delta R_{эфф}$ от широты. Значение $\Delta R_{эфф}$ достигло максимального падения (≈ -0.8 ГВ) на главной фазе в момент максимума бури ($Dst = -163$ нТл) на станции с самой низкой пороговой жесткостью R_c (KGSN).

На главной фазе бури $\Delta R_{сгс}$ понижается более медленно и на меньшую величину, чем $\Delta R_{эфф}$. Кроме того, на общий ход $\Delta R_{сгс}$, который в целом следует за Dst , наложены колебания с периодом порядка нескольких часов. Амплитуда этих колебаний на фазе восстановления примерно того же порядка, что и понижения $\Delta R_{сгс}$ в районе максимума бури: (например, через 2 ч после максимума бури на ст. IRKT $\Delta R_{сгс} = -0.45$ ГВ). Такие скачки $\Delta R_{сгс}$ особенно характерны на восстановительной фазе бури на низкоширотных станциях. Поэтому нельзя определить с достаточной точностью максимальное падение жесткостей геомагнитного обрезания во время бури. Можно лишь отметить, что, кроме эволюции кольцевого тока (~30 ч для данной бури), который определяет $\Delta R_{эфф}$, существенный вклад, по-видимому, вносят и другие более короткопериодные (~2–3 ч) процессы. Рисунок 2 демонстрирует также тот факт, что разница между кривыми $\Delta R_{эфф}$ и $\Delta R_{сгс}$ зависит от ши-

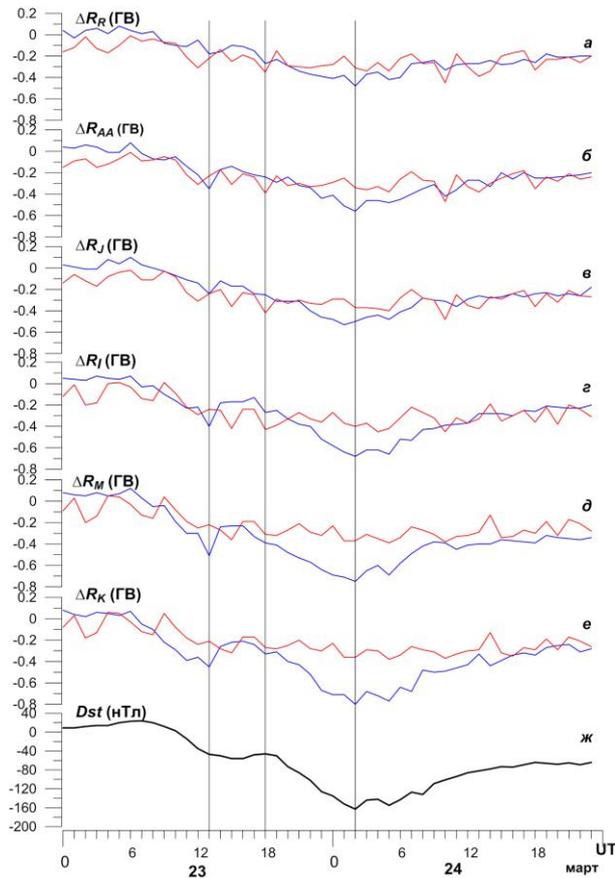


Рис. 2. Вариации геомагнитных порогов $\Delta R_{\text{сгс}}$ (красные линии) и $\Delta R_{\text{эфф}}$ (синие линии) во время бури 23–24 сентября 2023 г. Сверху вниз для ст. ROME (а), AATB (б), JUNG (в), IRKT (г), MOSC (д) и KGSN (е). На панели (ж) приведены значения бурового индекса Dst . Вертикальные линии указывают главную фазу бури и начало активной фазы (18:00 UT 23 марта)

роты. Эта разница достигает максимального значения 0.44 ГВ в момент минимума Dst для ст. KGSN с минимальной $R_c = 1.90$ ГВ.

2.2. Корреляционный анализ

На временных кривых рис. 2 видно, что $\Delta R_{\text{эфф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ изменяются в соответствии с эволюцией бури и тем самым с изменениями параметров СВ и геомагнитной активности. Для того чтобы количественно оценить связь исследуемых параметров и вариаций геомагнитных порогов, мы провели анализ корреляций ΔR с параметрами СВ, ММП и индексами геомагнитной активности. Были вычислены коэффициенты корреляции k и стандартные ошибки s . На рис. 3 корреляция k между ΔR и исследуемыми параметрами СВ, ММП и геомагнитосферы во время бури 23–24 марта 2023 г. представлена в виде диаграмм. На панели а показана корреляция вариаций модельных порогов $\Delta R_{\text{эфф}}$ с межпланетными параметрами, на панели б — корреляция наблюдаемых $\Delta R_{\text{сгс}}$. Столбцы диаграмм разных цветов соответствуют результатам корреляционного анализа для разных станций. При этом столбцы (станции) расположены в порядке возрастания широты (убывания порога станции в спокойное время).

Видно на панели а, что наибольшая корреляция наблюдается между $\Delta R_{\text{эфф}}$ и Dst . Для $\Delta R_{\text{эфф}}$

$k = 0.96 \pm 0.05$ на ст. YUNG. На других станциях k практически тот же. Также высокая, но несколько меньшая отрицательная корреляция видна для K_p . Например, на ст. MOSC $k = -0.8 \pm 0.14$. Корреляция, близкая к $k = -0.8$, получена для связи модельных геомагнитных порогов с общим магнитным полем B . На ст. MOSC $k = -0.74 \pm 0.16$, на ст. ESOI $k = -0.7 \pm 0.08$. При этом $k < 0$. Высокая антикорреляция получена также для связи с E_y : $k = -0.68 \pm 0.18$ на ст. MOSC. Близкие значения k найдены и для остальных станций. Достаточно высокая корреляция примерно одного порядка $\sim 0.65 - 0.7$ получена для β и B_z . Отметим, что связь $\Delta R_{\text{эфф}}$ с B_z меньше, чем с полным полем B . Значение k значительно меньше для корреляции между $\Delta R_{\text{эфф}}$ и B_y . Например, $k = 0.39 \pm 0.14$ на ст. ROME. Такого же порядка k , вычисленные для корреляции $\Delta R_{\text{эфф}} - V$ и еще меньше для антикорреляции $\Delta R_{\text{эфф}} - N$ и $\Delta R_{\text{эфф}} - P$. Можно утверждать, что изменения жесткостей геомагнитного обрезания наиболее тесно связаны с изменениями индексов геомагнитной активности. Кроме того, в изменения порогов вносят существенный вклад все электромагнитные параметры, кроме B_y . Что касается динамических параметров СВ, связь с ними прослеживается слабо. Следует отметить тот факт, что коэффициенты корреляции $\Delta R_{\text{эфф}}$ со всеми параметрами, рассчитанные для разных станций, крайне незначительно отличаются между собой.

Несколько другая картина наблюдается для изменения пороговых жесткостей, полученных методом СГС (панель б). В целом коэффициенты связи для наблюдательных $\Delta R_{\text{сгс}}$ ниже, чем для модельных $\Delta R_{\text{эфф}}$. Наибольшая корреляция для среднеширотных станций наблюдается между $\Delta R_{\text{сгс}}$ и Dst , а также β , доходя почти до 0.8. Наибольшего значения k достигает для ст. KGSN (0.79 ± 0.07). На низкоширотных станциях ESOI и ATHN корреляция с Dst практически отсутствует. То же самое можно сказать и про связь $\Delta R_{\text{сгс}}$ с общим магнитным полем B и β . Наиболь-

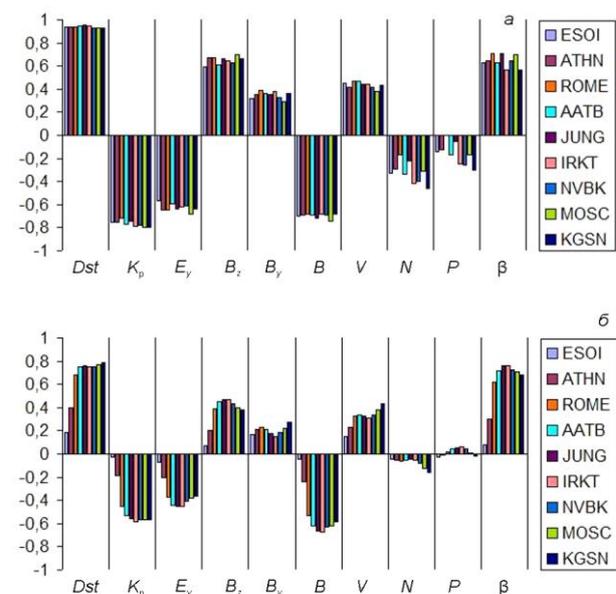


Рис. 3. Коэффициенты корреляции k между жесткостями обрезания и параметрами гео- и гелиосферы во время бури 23–24 марта 2023 г.: а — $\Delta R_{\text{эфф}}$; б — $\Delta R_{\text{сгс}}$

шего значения корреляция $\Delta R_{\text{сгс}} - \beta$ достигает на среднеширотных станциях JUNG и IRKT ($k=0.76 \pm 0.08$), а для $\Delta R_{\text{сгс}} - B$ $k=-0.67 \pm 0.09$. Для остальных параметров корреляция значительно ниже, а для динамических параметров СВ N и P она отсутствует.

2.3. Корреляции геомагнитных порогов с параметрами СВ, ММП и геомагнитной активности

На рис. 4 показана связь изменений геомагнитных порогов ΔR и исследуемых параметров СВ, ММП и геомагнитной активности в зависимости от жесткостей R_c геомагнитного обрезания станций в спокойное время. Показаны k для $\Delta R_{\text{эфф}}$ (а) и $\Delta R_{\text{сгс}}$ (б), а также цвета и символы, которые различают кривые, относящиеся к параметрам Dst , K_p , B_z , E_y , B_y , P , B , β , V , и N . Кривые на панелях а, б подтверждают выводы, полученные из диаграмм (см. рис. 3, а, б), о том, что наибольшая корреляция наблюдается между $\Delta R_{\text{сгс}}$ и Dst , β и несколько меньшая с B_z , а наибольшая антикорреляция — с B , K_p и E_y . Кроме того, на панели б показана зависимость k от широты и соответственно от R_c . Видно, что наибольшая корреляция наблюдается на средних широтах, для которых $R_c \approx 2 \div 6$ ГВ, а максимальная — на ст. IRKT и JUNG, для которых $R_c = 3.13$ и 4.51 соответственно. При увеличении $R_c > 6$ ГВ наблюдается существенное падение k . Для остальных исследуемых параметров k мало, поэтому оно не является геоэффективным и не представляет интереса.

Для $\Delta R_{\text{эфф}}$ (а) наибольшие корреляция и антикорреляция в соответствии с рис. 3, а фиксируются для тех же параметров, что и для $\Delta R_{\text{сгс}}$, — с Dst , β , B_z , K_p , B и E_y . Однако k для всех параметров корреляции $\Delta R_{\text{эфф}}$ выше, чем для корреляции $\Delta R_{\text{сгс}}$. Что касается зависимости от широты, слабая тенденция, аналогичная широтному эффекту в $\Delta R_{\text{сгс}}$, может быть отмечена лишь для B_z и E_y . Для остальных исследуемых параметров зависимости от широты практически не наблюдается. Здесь мы тоже обсуждаем только геоэффективные параметры, для которых k достаточно велико.

2.4. Корреляция $\Delta R_{\text{эфф}}$ с $\Delta R_{\text{сгс}}$

Сравним результаты, полученные методом СГС и траекторными расчетами с использованием модели Ts01. Для этого мы рассчитали корреляцию k между $\Delta R_{\text{эфф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ (табл. 3).

Из анализа рис. 3, 4 видно, что $\Delta R_{\text{эфф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ в целом аналогично описывают изменение порогов в процессе эволюции бури и вклад в эти вариации параметров гелио- и геосферы. И это несмотря на то, что падение значений модельных порогов $\Delta R_{\text{эфф}}$ систематически превышает падение наблюдательных $\Delta R_{\text{сгс}}$. Из табл. 2 видно, что корреляция k во время исследуемой бури между наблюдательными и модельными пороговыми для всех станций, кроме ст. ESOI и ATHN, достаточно высокая: начиная от $k=0.71 \pm 0.07$ для ст. ROME до максимума корреляции $k=0.78 \pm 0.07$ для среднеширотной станции JUNG. Такое поведение k указывает на аналогичную чувствительность к межпланетным и геомагнит-

ным параметрам наблюдательных и модельных вариаций геомагнитных порогов для станций с $R_c < 6.11$ ГВ (ROME). Низкая корреляция $\Delta R_{\text{эфф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ на ст. ESOI и ATHN отражает разницу в широтном эффекте, заметном на низкоширотных станциях (см. 2.3).

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе мы рассмотрели вариации жесткостей геомагнитного обрезания $\Delta R_{\text{эфф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ во время бури 23–24 марта 2023 г., вычисленные двумя различными методами, наблюдательным и модельным. Кроме того, мы исследовали связь этих вариаций с электромагнитными и динамическими параметрами солнечного ветра и геомагнитной активности, а также зависимость такой связи от широты.

Выявлено, что геомагнитные пороги, вычисленные обоими методами, наиболее сильно коррелируют с геомагнитной активностью, особенно с Dst , что указывает на наибольший вклад в вариации жесткостей кольцевого тока. Кроме того, высокая корреляция достигается и с электромагнитными параметрами ММП B , β , B_z , E_y . Существенной корреляции с динамическими параметрами СВ V , N , P не наблюдается. Считается, что развитие магнитной бури в основном зависит от двух параметров: от южной компоненты ММП, рост которой приводит к пересоединению магнитного поля СВ и магнитосферы Земли, и от давления СВ P , рост которого приводит к сжатию магнитосферы [Dungey, 1961; Burton et al., 1975; Akasofu, 1984]. Однако развитие исследуемой бури и соответственно уменьшение геомагнитного экранирования и вариации жесткостей геомагнитного обрезания действительно определялись B_z и еще в большей степени общим магнитным полем V и плазменным параметром β , в то время как P и остальные динамические параметры СВ практически не играли никакой роли. Отметим, что такие результаты получены для сильной бури в марте 2023 г., т. е. на восходящей ветви 25-го солнечного цикла за полтора года до максимума. Эти результаты в целом согласуются с выводами, полученными для сильной бури 8–11 марта 2012 г. также на растущей ветви 24-го цикла за два года до максимума, о преимущественном влиянии Dst и некоторых электромагнитных параметров на ΔR [Данилова и др., 2023]. В то же время для большинства бурь, в основном зафиксированных вне максимума цикла [Птицына и др., 2019], кроме неизменной наиболее сильной корреляции с Dst и с электромагнитными параметрами, можно отметить также существенную связь геомагнитных порогов со скоростью СВ V . При этом наборы других контролирующих параметров для индивидуальных бурь отличаются между собой. Тем не менее, по-видимому, можно сделать вывод о том, что свойства геомагнитного экрана во время сильных возмущений зависят от фазы солнечного цикла, в котором произошло событие. Однако эти выводы нуждаются в дальнейшей более детальной проверке.

Анализ показал, что реакция $\Delta R_{\text{сгс}}$ на контролирующие электромагнитные параметры, а также Dst и K_p меняется с широтой станции наблюдения: корреляция достигает наибольших значений на средних

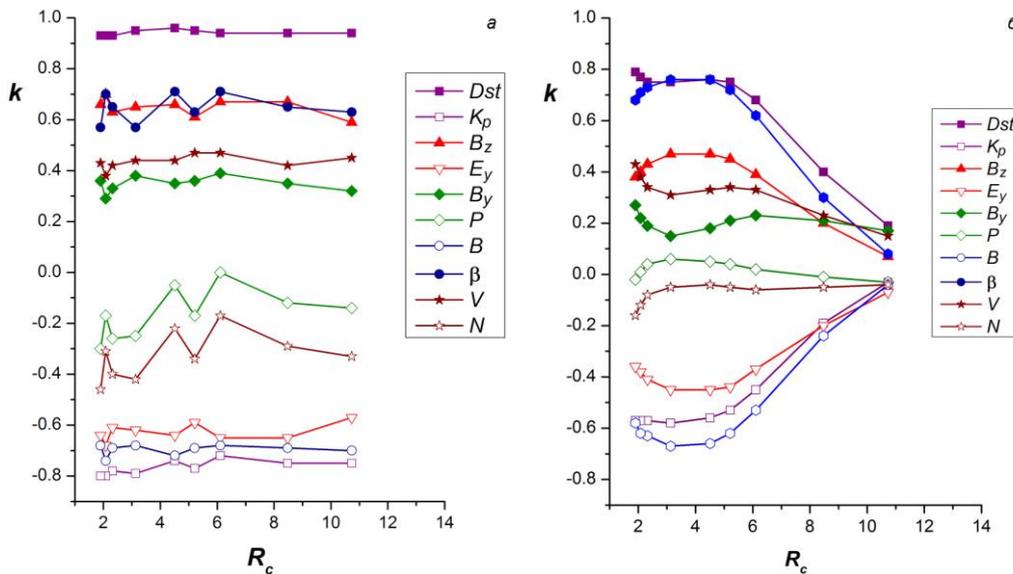


Рис. 4. Коэффициенты корреляции k между жесткостями геомагнитного обрезания и параметрами гео- и гелиосферы в зависимости от широты: a — $\Delta R_{эфф}$; b — $\Delta R_{сгс}$

Таблица 2

Коэффициенты корреляции k между значениями $\Delta R_{эфф}$ и $\Delta R_{сгс}$

| | ESOI | ATHN | ROME | AATB | JUNG | IRKT | NVBK | MOSC | KGSN |
|-----|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| k | 0.14 ± 0.13 | 0.42 ± 0.1 | 0.71 ± 0.07 | 0.76 ± 0.07 | 0.78 ± 0.07 | 0.71 ± 0.09 | 0.76 ± 0.08 | 0.77 ± 0.08 | 0.73 ± 0.08 |

широтах ($R_c \approx 2-6$ ГВ) и значительно падает к экватору. Для корреляций $\Delta R_{эфф}$ с межпланетными и геомагнитными параметрами практически не найдено широтной зависимости, только корреляция $\Delta R_{эфф}$ с B_z и E_y показывает аналогичный, но более слабый широтный эффект.

Несмотря на некоторую разницу в величине и поведении k , на низкоширотных станциях в целом корреляция между $\Delta R_{эфф}$ и $\Delta R_{сгс}$ достаточно высокая (0.7). Это свидетельствует о том, что оба используемых метода достаточно адекватно описывают ΔR в зависимости от изменения геомагнитных и межпланетных параметров на средних широтах. Разница в полученных этими методами эффектах на низкоширотных станциях требует дополнительного исследования.

Авторы благодарны за возможность использования базы данных OMNI [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>]. Работа выполнена частично при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Результаты для $\Delta R_{сгс}$ получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>] и научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (сеть СКЛ) [<https://ckp-rf.ru/usu/433536>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Буров В.А., Мелешков Ю.С., Очелков Ю.П. Методика оперативной оценки уровня радиационной опасности, обусловленной возмущениями космической погоды, при авиаперевозках. *Гелиогеофизические исследования*. 2005, вып. 7, с. 1–41.

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Изменения жесткостей обрезания космических лучей во время бури 8–11 марта 2012 г. в период CAUSES-II. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 2, с. 86–93. DOI: [10.12737/szf-92202310](https://doi.org/10.12737/szf-92202310) / Danilova O.A., Pitsyna N.G., Tyasto M.I., Sdobnov V.E. Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the March 8–11, 2012 magnetic storm (CAUSES II period). *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 2, pp. 81–87. DOI: [10.12737/stp-92202310](https://doi.org/10.12737/stp-92202310).

Куражковская Н.А., Зотов О.Д., Клайн Б.И. Связь развития геомагнитных бурь с параметром β солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2021, т. 7, № 4, с. 25–34. DOI: [10.12737/szf-74202104](https://doi.org/10.12737/szf-74202104) / Kurazhkovskaya N.A., Zotov O.D., Klain B.I. Relationship between geomagnetic storm development and the solar wind parameter β . *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, no. 4, pp. 25–34. DOI: [10.12737/szf-74202104](https://doi.org/10.12737/szf-74202104).

Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Влияние параметров солнечного ветра и геомагнитной активности на вариации жесткости обрезания космических лучей во время сильных магнитных бурь. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2019, т. 59, № 5, с. 569–577. DOI: [10.1134/S0016793219050098](https://doi.org/10.1134/S0016793219050098).

Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.N., et al. PAMELA’s measurements of geomagnetic cutoff variations during the 14 December 2006 storm. *Space Weather*. 2016, vol. 14, no. 3. DOI: [10.1002/2016SW001364](https://doi.org/10.1002/2016SW001364).

Akasofu S.-I. The magnetospheric currents: An introduction. In T.A. Potemra (Ed.), *Magnetospheric currents. Geophysical Monograph Series*. 1984, vol. 28, pp. 29–48. DOI: [10.1029/GM028p0029](https://doi.org/10.1029/GM028p0029).

Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst*. *J. Geophys. Res.* 1975, vol. 80, iss. 31, pp. 4204–4214. DOI: [10.1029/JA080i031p04204](https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204).

Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys Rev Lett*. 1961, vol. 6, pp. 47–48. DOI: [10.1103/PhysRevLett.6.47](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47).

- Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V., et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits. *Space Weather*. 2005, vol. 3, S01001. DOI: [10.1029/2003SW000056](https://doi.org/10.1029/2003SW000056).
- Kanekal S., Baker D., Blake J., et al. High-latitude energetic particle boundaries and the polar cap: A statistical study. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1998, vol. 103, pp. 9367–9372.
- Kovalev I.I., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. A proposal to extend the spectrographic global survey method. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2022, vol. 235, p. 105887. DOI: [10.1016/j.jastp.2022.105887](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105887).
- Leske R.A., Mewaldt R.A., Stone E.C., von Rosenvinge T.T. Observations of geomagnetic cutoff variations during solar energetic particle events and implications for the radiation environment at the space station. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 30011–30022. DOI: [10.1029/2000JA000212](https://doi.org/10.1029/2000JA000212).
- Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G. A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field. *J. Geophys. Res.* 1965, vol. 70, pp. 4117–4130.
- Shimazu H. Solar proton event and proton propagation in the Earth's magnetosphere. *J. National Institute of Information and Communications Technology*. 2009, vol. 1, pp. 191–199.
- Tahir A., Wu F., Shah M., et al. Multi-instrument observation of the ionospheric irregularities and disturbances during the 23–24 March 2023 geomagnetic storm. *Remote Sensing*. 2024, vol. 16, no. 9, p. 1594. DOI: [10.3390/rs16091594](https://doi.org/10.3390/rs16091594).
- Teng W., Su Y., Ji H., Zhan Q. Unexpected major geomagnetic storm caused by faint eruption of a solar transequatorial flux rope. *Nature Communications*. 2024, vol. 15, pp. 9198–9214. DOI: [10.1038/s41467-024-53538-1](https://doi.org/10.1038/s41467-024-53538-1).
- 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, no. A5, p. 1209. DOI: [10.1029/2002JA009808](https://doi.org/10.1029/2002JA009808).
- Tyasto M.I., Danilova O.A., Sdobnov V.E. Cosmic ray geomagnetic cutoff rigidities in the magnetic field of two empirical models during a strong disturbance in November 2003: A comparison of models. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012, vol. 52, pp. 1087–1096. DOI: [10.1134/S0016793212080208](https://doi.org/10.1134/S0016793212080208).
- Tyssøy H.N., Stadsnes J. Cutoff latitude variation during solar proton events: Causes and consequences. *J. Geophys. Res. Space*. 2014, vol. 120, pp. 553–563. DOI: [10.1002/2014JA0200508](https://doi.org/10.1002/2014JA0200508).
URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 16 января 2024 г.).
URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 16 января 2024 г.).
URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 16 января 2024 г.).
URL: <https://ckp-rf.ru/usu/433536> (дата обращения 16 января 2024 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Сдобнов В.Е. Геомагнитное обрезаение космических лучей во время магнитной бури 23–24 марта 2023 г: связь с параметрами солнечного ветра и геомагнитной активностью с учетом широтных эффектов. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 42–49. DOI: [10.12737/szf-113202505](https://doi.org/10.12737/szf-113202505).