

ИЗМЕНЕНИЯ ЖЕСТКОСТЕЙ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ БУРИ 8–11 МАРТА 2012 г. В ПЕРИОД CAWSES-II

VARIATIONS IN COSMIC RAY CUTOFF RIGIDITIES DURING THE MARCH 8–11, 2012 MAGNETIC STORM (CAWSES II PERIOD)

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, nataliaptitsyna@ya.ru

М.И. Тясто

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

В.Е. Сдобнов

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sдобнов@iszf.irk.ru

O.A. Danilova

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

N.G. Ptitsyna

Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, St. Petersburg Branch, RAS,
St. Petersburg, Russia, nataliaptitsyna@ya.ru

M.I. Tyasto

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

V.E. Sdobnov

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

Аннотация. Жесткости геомагнитного обрезания космических лучей (КЛ) являются основным фактором, регулирующим приход частиц в данную точку на земной поверхности или внутри магнитосферы. Для изучения связи жесткостей геомагнитного обрезания (геомагнитных порогов) и параметров околоземного пространства выбрана наиболее сильная магнитная буря 8–11 марта 2012 г., которая наблюдалась в интервале CAWSES-II, рекомендованном SCOSTEP для детальных исследований солнечно-земных связей. Геомагнитные пороги были рассчитаны двумя способами: 1) методом траекторных расчетов в магнитном поле возмущенной магнитосферы Цыганенко по модели Ts01; 2) методом спектрографической глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов. Максимальное уменьшение жесткостей геомагнитного обрезания (–1.1 ГВ), полученных вторым методом, наблюдается на восстановительной фазе бури. По-видимому, это связано с влиянием суперсуббурь, которые развивались в это время. Анализ показал, что наиболее сильная связь вариаций жесткости геомагнитного обрезания прослеживается с *Dst*-индексом геомагнитной активности, что свидетельствует об определяющем вкладе кольцевого тока в перенос КЛ. Кроме того, найдена существенная связь с параметрами электромагнитного поля (с B_z -компонентой межпланетного магнитного поля и азимутальной компонентой электрического поля E_y). Динамические параметры солнечного ветра практически не контролируют вариации жесткостей геомагнитного обрезания КЛ.

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

Abstract. The geomagnetic cutoff rigidity of cosmic rays (CRs) is the main factor regulating the arrival of CR particles at a given point on Earth's surface or inside the magnetosphere. To study the relationship between cutoffs and near-Earth space parameters, we have selected the strongest magnetic storm that occurred on March 8–11, 2012 during the CAWSES-II interval, recommended by SCOSTEP for detailed studies of solar-terrestrial relations. We have found the geomagnetic cutoffs by two methods: 1) by trajectory calculations in the magnetic field of the perturbed magnetosphere according to the Ts01 model and 2) by the spectrographic global survey method according to the data from the world network of neutron monitors. The largest drop in the cutoffs (–1.1 GV) obtained by the latter method was observed during the recovery phase of the storm. Apparently, this is due to the influence of the supersubstorms that occurred at that time. The analysis has shown that the closest connection of variations in the cutoffs can be traced with the geomagnetic activity index *Dst*, which indicates the determining contribution of the ring current to the transport of CRs. In addition, we have found a significant connection with the electromagnetic field parameters (with the B_z component of the interplanetary magnetic field and the azimuthal component of the electric field E_y). The dynamic solar wind parameters practically do not control variations in CR geomagnetic cutoff rigidities.

Keywords: geomagnetic threshold, cosmic rays, supersubstorm, interplanetary magnetic field, geomagnetic activity.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения климата в последние десятилетия стимулируют поиск механизмов влияния различных факторов космической погоды на земную погоду и климат. Одним из важных факторов, от которых зависит космическая погода, являются космические лучи (КЛ). Изменения потоков КЛ обуславливают ионизацию атмосферы, которая связана, в частности, с такими процессами, как образование облачности, гроз, тропических ураганов [Carslaw et al., 2002; Makrantonis et al., 2013]. Период 7–17 марта 2012 г. был рекомендован SCOSTEP для детальных исследований эффектов космической погоды в системе Солнце–Земля во время возмущений. Этот период назван CAWSES-II (The Climate and Weather of the Sun–Earth System). Во время активного периода CAWSES-II наблюдалось четыре геомагнитные бури: 7, 9, 12 и 15 марта [Tsurutani et al., 2014]. Причиной этих бурь были солнечные вспышки и связанные с ними корональные выбросы массы (СМЕ) из солнечной активной области 1429AR и сопутствующие межпланетные структуры (ударные фронты, области сжатия перед межпланетными СМЕ и магнитными облаками). Эти образования, достигая Земли, следовали друг за другом и частично перекрывались.

Жесткости геомагнитного обрезания R (геомагнитные пороги) являются основным фактором, регулирующим приход частиц КЛ в данную точку на земной поверхности или внутри магнитосферы. Вариации потоков КЛ в магнитосфере во время магнитных бурь обусловлены в основном изменениями жесткости геомагнитного обрезания ΔR и асимптотических направлений прихода частиц в заданную точку магнитосферы [Dorman, 1963]. В свою очередь, R зависит от экранирующих свойств магнитного поля Земли. Геомагнитные бури подавляют геомагнитное экранирование вследствие уменьшения силы поля внутри магнитосферы из-за формирования кольцевого тока, токов магнитопаузы, хвоста магнитосферы и продольных высокоширотных токов. В результате этого космические частицы могут проникать на более низкие широты.

Знание зависимостей значений ΔR от параметров солнечного ветра (СВ) и магнитосферы может прояснить некоторые аспекты взаимодействия системы СВ — магнитосфера и сопутствующие геомагнитные эффекты, которые управляют транспортировкой КЛ через магнитосферу и атмосферу во время магнитных бурь. Для исследования нами была выбрана наиболее сильная магнитная буря в интервале CAWSES-II, максимум которой наблюдался 9 марта 2012 г. ($Dst \sim -143$ нТл).

Целью работы было исследование вариаций геомагнитных порогов в период бури 8–11 марта 2012 г., а также их связи с параметрами СВ, межпланетного магнитного поля (ММП) и геомагнитной активности. Эта статья является продолжением наших работ [Птицына и др., 2019, 2020, 2021], где исследовались вариации жесткостей геомагнитного обрезания КЛ во время сильных бурь. Для каждой из этих бурь

корреляционные соотношения имеют свой неповторимый характер, поэтому важно для выявления общих закономерностей проанализировать как можно больше сильных бурь и создать базу данных. Новым элементом данной работы является то, что мы провели анализ корреляций изменений геомагнитных порогов с межпланетными параметрами и индексами геомагнитной активности во время каждой из трех фаз развития бури в интервале CAWSES-II и проанализировали широтный эффект этих изменений.

1. МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Вариации жесткостей геомагнитного обрезания (геомагнитных порогов) КЛ ΔR в период данной бури рассчитаны двумя методами.

Первый — метод спектрографической глобальной съемки (СГС), в котором определение жесткостей $R_{\text{сгс}}$ базируется на наблюдательных данных мировой сети нейтронных мониторов [Dvornikov et al., 2013]. В основе метода СГС лежит рассмотрение процессов изменения энергии заряженных частиц в регулярных электромагнитных полях гелиосферы. Метод СГС дает возможность по наземным наблюдениям космических лучей на мировой сети станций получать информацию о распределении первичных КЛ по энергиям и питч-углам в ММП, об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений. Данное обстоятельство позволяет, наряду с фазами первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии, определять жесткостной спектр изотропной составляющей и анизотропию КЛ, по фазе питч-угловой анизотропии получать информацию об ориентации ММП, определять вариации планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания, а использование данных наблюдений нестабильных заряженных компонент КЛ дает возможность определять температурные характеристики атмосферы в пунктах регистрации этих компонент за каждый час наблюдений или за меньшие временные интервалы. В табл. 1 показаны (в зависимости от статистических ошибок измерений нейтронной $I_{\text{нм}}$ и заряженной $I_{\text{мт}}$ компонент КЛ) стандартные ошибки величин, определяемых методом СГС по данным наземных наблюдений КЛ: дифференциального жесткостного спектра A_0 , амплитуд A_1 и A_2 питч-угловой анизотропии КЛ, изменения жесткости геомагнитного обрезания $\Delta R_{\text{сгс}}$, долготного λ и широтного Ψ углов ММП, средне-массовой $\Delta T_{\text{см}}$ и приземной $\Delta T_{\text{пс}}$ температур атмосферы.

При вычислении изменений пороговых жесткостей геомагнитного обрезания использовались данные мировой сети станций КЛ с часовым периодом накопления [<http://www01.nmdb.eu/data>]. Вариации жесткостей геомагнитного обрезания $\Delta R_{\text{сгс}}$, полученные этим методом, далее будем называть «наблюдательными».

Второй метод определения жесткостей геомагнитного обрезания основывается на численном расчете траекторий частиц в модельном магнитном поле магнитосферы [Shea et al., 1965], при этом точность

Таблица 1

Стандартные ошибки определяемых методом СГС величин
для разных статистических ошибок данных нейтронного монитора и мезонного телескопа

$I_{\text{НМ}}, \%$	$I_{\text{МТ}}, \%$	$\lambda,$ град.	$\Psi,$ град.	$A_0,$ %	$A_1, \%$	$A_2, \%$	$\Delta R_{\text{с}}, \text{ГВ}$	$T_{\text{пс}}, \text{°C}$	$T_{\text{см}}, \text{°C}$
± 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
	± 0.2	± 17.5	± 22.1	± 1.6	± 8.9	± 1.8	± 0.05	± 2.5	± 1.0

определения геомагнитных порогов $R_{\text{эф}}$ зависит от точности магнитосферной модели. В данной работе используется полумпирическая модель Ts01 магнитного поля магнитосферы, разработанная для сильных магнитных возмущений (см. [Tsyganenko et al., 2003] и ссылки там). Согласно этой модели магнитное поле внутри магнитосферы (без главного магнитного поля) представляет собой сумму вкладов от основных магнитосферных токовых систем. Параметризация токовых систем в модели Ts01 проведена с использованием спутниковых данных, измеренных во время 37 геомагнитных бурь с $Dst \leq -65$ нТл [Tsyganenko et al., 2003]. Модель включает токи Чепмена—Ферраро, которые удерживают земное магнитное поле внутри границы магнитосферы, симметричный и частичный объемные круговые токи, поперечные токи хвоста и крупномасштабные продольные токи. Чтобы ограничить поле внутри магнитосферы, в модель включен блок, описывающий поле взаимодействия, которое отражает эффект проникновения ММП внутрь магнитосферы. Поле взаимодействия представлено в виде однородного магнитного поля, пропорционального поперечной компоненте и направленного вдоль нее. Для расчетов магнитного поля внутренних источников используется представление главного магнитного поля Земли в виде разложения в ряд по сферическим гармоническим функциям до $n=10$. Входными параметрами модели Ts01 являются Dst -вариация, плотность и скорость СВ, а также компоненты ММП. Вариации жесткостей обрезания $\Delta R_{\text{эф}}$, полученные этим методом, далее будем называть «модельными».

Расчеты проводились для каждого часа для следующих станций: 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). Станции выбирались таким образом, чтобы в спокойное время охватывалась основная область пороговых жесткостей $R_{\text{с}}$, подверженных влиянию геомагнитного поля: ESOI (10.8 ГВ), Алматы (6.61 ГВ), Рим (6.24 ГВ), Иркутск (3.66 ГВ), Москва (2.39 ГВ) и Кингстон (1.88 ГВ). Расчеты вариаций геомагнитных порогов проведены по отношению к средним жесткостям в спокойное время, рассчитанным на 8 января 2012 г.

Далее вычислялись коэффициенты корреляции k вариаций жесткостей обрезания $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ с параметрами СВ, ММП и геомагнитной активности для перечисленных станций. Параметры, с которыми мы устанавливаем связь геомагнитных поро-

гов, следующие: компоненты B_z и B_y , а также полное значение ММП B , азимутальная компонента E_y электрического поля, скорость V , плотность N и давление P СВ и индексы геомагнитной активности Dst и K_p . Эти параметры взяты на сайте [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Поведение жесткостей обрезания и параметров околоземной среды

На рис. 1 приведены значения модельных $\Delta R_{\text{эф}}$ (а) и наблюдательных $\Delta R_{\text{сгс}}$ (б) изменений жесткости геомагнитного обрезания в период 8–11 марта 2012 г. для исследуемых разноширотных станций, а также параметры электромагнитного поля (E_y, B_z, B_y), СВ (V и P) и вариации Dst -индекса геомагнитного поля (δ –з).

Геомагнитная буря началась с приходом межпланетного магнитного облака и поворотом к югу B_z -компоненты ММП [Tsurutani et al., 2014]. Буря достигла максимума ($Dst = -143$ нТл) в 08:00 UT 9 марта (рис. 1), что можно связать с $B_z = -14.5$ нТл в начале магнитного облака.

На рис. 1, а, б видно, что на начальной и главной фазах бури модельные и наблюдательные ΔR ведут себя схожим образом. На главной фазе отмечается значительное уменьшение изменения геомагнитных порогов до $\Delta R_{\text{эф}} = -0.69$ ГВ и $\Delta R_{\text{сгс}} = -0.59$ ГВ. Далее на восстановительной фазе значения $\Delta R_{\text{эф}}$ (рис. 1, а) возрастают, однако значения $\Delta R_{\text{сгс}}$ (рис. 1, б) ведут себя похожим образом только на низкоширотных станциях с высокими пороговыми жесткостями в спокойное время $R_{\text{с}} = 6–11$ ГВ (Рим, Алматы, ESOI). В это время наблюдаются сильные расхождения между значениями $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ на станциях с низкими пороговыми жесткостями $R_{\text{с}} = 4–1.8$ ГВ (Иркутск, Москва, Кингстон). Значения $\Delta R_{\text{сгс}}$ на этих станциях, в отличие от значений $\Delta R_{\text{эф}}$, продолжают уменьшаться еще в течение семи часов после достижения бурей максимальной интенсивности (минимум Dst 9 марта в 08:00 UT) до минимального значения $\Delta R_{\text{сгс}} = -1.1$ ГВ в 15:00 UT на ст. Москва. Таким образом, максимальное уменьшение $\Delta R_{\text{сгс}}$ на восстановительной фазе в два раза превышает уменьшение на главной фазе бури.

2.2. Широтные зависимости

На рис. 2 приведены изменения геомагнитных порогов $\Delta R_{\text{сгс}}$ (а) и $\Delta R_{\text{эф}}$ (б) в зависимости от поро-

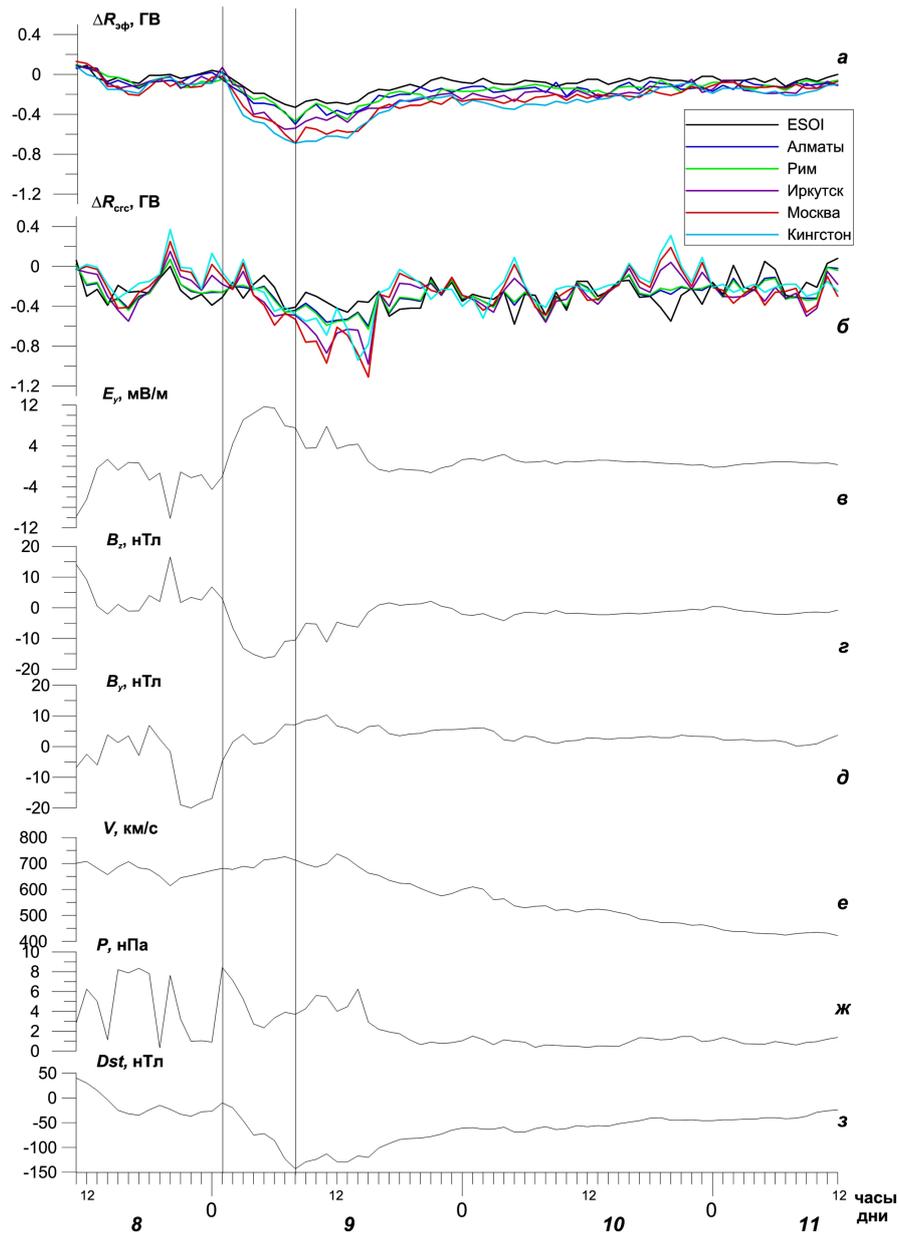


Рис. 1. Изменения жесткостей обрезания КЛ $\Delta R_{эф}$ (а) и $\Delta R_{ср}$ (б) на разных станциях, а также параметров ММП E_y (в), B_z (з), B_y (д), скорости V (е) и давления P (ж) СВ и Dst -индекса геомагнитной активности (з) во время геомагнитной бури 8–11.03.2012. Вертикальные линии отмечают главную фазу бури

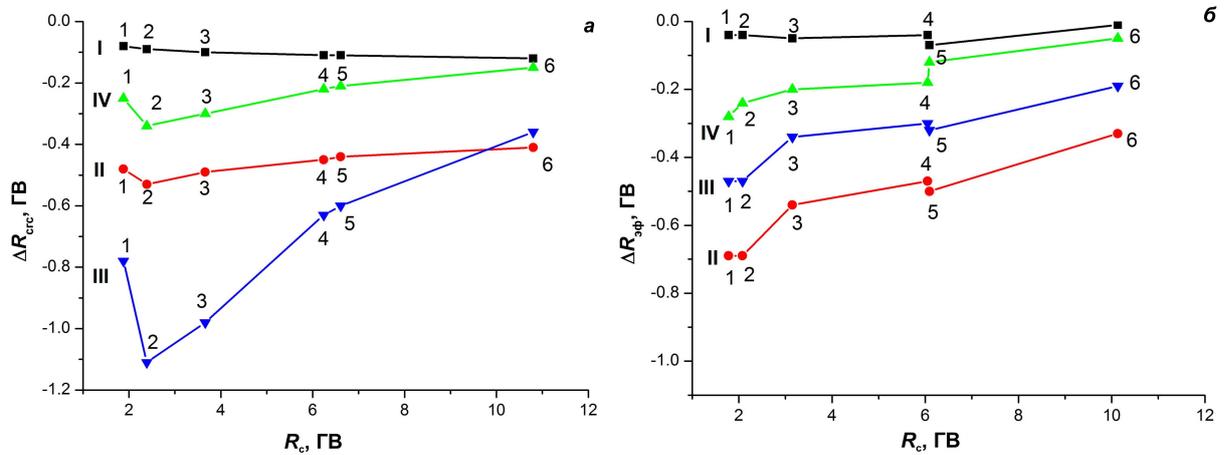


Рис. 2. Изменения жесткостей обрезания $\Delta R_{ср}$ (а) и $\Delta R_{эф}$ (б) в зависимости от пороговой жесткости R_c при различной возмущенности магнитосферы, определяемой Dst , в моменты бури I–IV. Станции обозначены в порядке возрастания R_c : 1 — Кингстон; 2 — Москва; 3 — Иркутск; 4 — Рим; 5 — Алматы; 6 — ESOI

вой жесткости R_c на выбранных разноширотных станциях. Широтные кривые приведены для нескольких моментов развития бури: на начальной фазе бури при $Dst = -15$ нТл (I: 08.03.2012, 19:00 UT); на главной фазе в максимуме бури при $Dst = -143$ нТл (II: 09.03.2012, 08:00 UT); на фазе восстановления при $Dst = -120$ нТл (III: 09.03.2012, 15:00 UT) и на следующий день при $Dst = -58$ нТл (IV: 10.03.2012, 12:00 UT).

На рис. 2 видно, что на начальной фазе бури, когда возмущенность мала, изменения геомагнитных жесткостей ΔR , полученные обоими методами, близки к нулю на всех станциях. На главной и восстановительной фазах бури значения $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ показывают существенную зависимость от R_c . Типичная широтная кривая демонстрирует максимум уменьшения жесткости обрезания на среднеширотных станциях (3–4 ГВ) на главной фазе бури [Dorman, 1963; Flueckiger et al., 1987; Belov et al., 2005; Kress et al., 2010; Данилова и др., 2020]. Характерной особенностью данной бури является то, что $\Delta R_{сгс}(R_c)$ формирует широтную кривую с максимумом падения, который более выражен на восстановительной фазе бури (III), чем на главной (II). При этом максимум сдвинут на более высокоширотную станцию Москва, для которой $R_c = 2.39$ ГВ. Для $\Delta R_{эф}$ на главной и восстановительной фазах прослеживается практически монотонный рост кривой $\Delta R_{эф}(R_c)$ (уменьшение изменения жесткостей) с увеличением пороговой жесткости R_c , т. е. с уменьшением широты станций.

2.3. Связь геомагнитных порогов с параметрами гелио- и геомагнитосферы

Для выяснения связей полученных изменений жесткостей геомагнитного обрезания КЛ с параметрами геомагнитной активности, СВ и ММП мы провели их корреляционный анализ для всех исследуемых станций. Результаты показаны в табл. 2. В верхней части таблицы приведены коэффициенты корреляции k для изменений модельных жесткостей геомагнитного обрезания, в нижней — для наблюдательных. В последней строке приведены коэффициенты корреляции K между значениями $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$.

Из табл. 2 видно, что коэффициент корреляции K между значениями $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ очень мал для низкоширотной станции ESOI ($R_c = 10.8$ ГВ), но с уменьшением R_c (ростом широты) он увеличивается и достигает значения $K = 0.68 \pm 0.13$ для ст. Кингстон ($R_c = 1.88$ ГВ). Наблюдается высокая степень корреляции значений $\Delta R_{эф}$ с Dst -вариацией ($0.88 \div 0.94$). Существенная корреляция видна с E_y ($-0.65 \div -0.75$) и с B_z ($0.63 \div 0.73$) для всех станций. Несколько меньшее значение k ($-0.45 \div -0.58$) характерно для связи $\Delta R_{эф}$ с B_y . Коэффициенты корреляции k между $\Delta R_{эф}$ и динамическими параметрами СВ V , N , P невысоки. Меньше всего коэффициент корреляции $\Delta R_{эф}$ с давлением СВ P — в среднем -0.1 .

Коэффициенты корреляции k между значениями $\Delta R_{сгс}$ и параметрами околоземной среды несколько меньше, чем для $\Delta R_{эф}$. Это совпадает с результатами,

полученными в работах, где сравнивались модельные и наблюдательные жесткости обрезания для других магнитных бурь (например, [Птицына и др., 2019] и ссылки там). Более высокие степени корреляции модельных значений $\Delta R_{эф}$ с Dst и параметрами СВ и ММП не являются неожиданностью, поскольку в модели Ts01 в качестве входных параметров, определяющих влияние межпланетных условий на магнитосферу и, соответственно, на жесткости обрезания, используются Dst , плотность N , скорость V СВ, а также компоненты ММП.

Далее мы построили диаграммы корреляционных соотношений $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ с геоэффективными параметрами, которые наиболее существенно влияют на вариации геомагнитных порогов на разных станциях. Для этого на рис. 3 приведены коэффициенты корреляции ΔR с параметрами, для которых значения $|k| \geq 0.4$.

Из приведенных диаграмм видно, что корреляционные картины для $\Delta R_{эф}$ (рис. 1, а) и $\Delta R_{сгс}$ (рис. 1, б) похожи. Наиболее геоэффективными параметрами, контролирующими геомагнитные пороги (как $\Delta R_{эф}$, так и $\Delta R_{сгс}$) на всех широтах, являются индексы геомагнитной активности Dst и K_p , а также азимутальная компонента электрического поля E_y и южная компонента ММП B_z . Геоэффективность динамических параметров СВ N и V незначительно проявляется только для отдельных станций для $\Delta R_{эф}$ (рис. 1, а) и полностью отсутствует для $\Delta R_{сгс}$ (рис. 1, б).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наши результаты показали, что во время сильной магнитной бури 8–11 марта 2012 г. наибольшая степень корреляции ΔR наблюдается с Dst , а также с электромагнитными параметрами B_z и E_y . Тот факт, что изменение геомагнитных порогов (как $\Delta R_{сгс}$, так и $\Delta R_{эф}$) наиболее сильно коррелирует с Dst -индексом, свидетельствует о главной роли кольцевого тока в контроле вариаций жесткостей геомагнитного обрезания КЛ на всех этапах бури. Значительная чувствительность к Dst , которая отмечалась ранее в работе [Птицына и др., 2019], является самой стабильной чертой взаимодействия изменений геомагнитных порогов с геомагнитосферой. В этой же работе показано, что связь ΔR с геомагнитной активностью демонстрирует четкую закономерность — корреляция увеличивается с уменьшением Dst , т. е. с ростом интенсивности бури.

Считается, что основную роль в развитии магнитосферных возмущений играет пересоединение магнитного поля СВ и поля геомагнитосферы, а также динамическое давление СВ P , ответственное за сжатие магнитосферы [Dungey, 1961; Akasofu, 1981; Russell, 2000]. Оба эти фактора ослабляют геомагнитное экранирование, уменьшают жесткость геомагнитного обрезания и облегчают проникновение плазмы СВ в магнитосферу и атмосферу Земли. В случае бури в марте 2012 г. мы получили, что контроль изменений жесткостей геомагнитного обрезания давлением СВ P практически отсутствует. Поворот к югу B_z -компоненты и начавшийся в результате него

Таблица 2

Коэффициенты корреляции k между значениями ΔR и параметрами геомагнитной активности, СВ и ММП

$\Delta R_{эф}$	ESOI	Алматы	Рим	Иркутск	Москва	Кингстон
Dst	0.88 ± 0.04	0.91 ± 0.05	0.94 ± 0.04	0.92 ± 0.05	0.94 ± 0.06	0.91 ± 0.08
K_p	-0.64 ± 0.07	-0.55 ± 0.09	-0.53 ± 0.09	-0.57 ± 0.12	-0.64 ± 0.13	-0.67 ± 0.13
E_y	-0.73 ± 0.06	-0.72 ± 0.08	-0.65 ± 0.08	-0.71 ± 0.10	-0.71 ± 0.12	-0.75 ± 0.12
B_z	0.71 ± 0.06	0.70 ± 0.08	0.63 ± 0.08	0.69 ± 0.10	0.68 ± 0.12	0.73 ± 0.12
B_y	-0.50 ± 0.08	-0.58 ± 0.09	-0.45 ± 0.10	-0.52 ± 0.12	-0.54 ± 0.14	-0.52 ± 0.15
B	-0.17 ± 0.09	-0.08 ± 0.11	-0.14 ± 0.11	-0.11 ± 0.14	-0.17 ± 0.17	-0.18 ± 0.18
V	-0.40 ± 0.08	-0.31 ± 0.11	-0.33 ± 0.10	-0.32 ± 0.13	-0.42 ± 0.15	-0.41 ± 0.16
N	0.25 ± 0.09	0.35 ± 0.11	0.45 ± 0.10	0.44 ± 0.13	0.38 ± 0.16	0.34 ± 0.17
P	-0.18 ± 0.09	-0.12 ± 0.11	-0.05 ± 0.11	-0.01 ± 0.14	-0.14 ± 0.17	-0.12 ± 0.18
<hr/>						
$\Delta R_{сгс}$	ESOI	Алматы	Рим	Иркутск	Москва	Кингстон
Dst	0.42 ± 0.13	0.64 ± 0.10	0.66 ± 0.10	0.65 ± 0.16	0.65 ± 0.19	0.64 ± 0.17
K_p	-0.31 ± 0.13	-0.46 ± 0.12	-0.47 ± 0.12	-0.46 ± 0.18	-0.46 ± 0.22	-0.41 ± 0.20
E_y	-0.18 ± 0.14	-0.41 ± 0.12	-0.42 ± 0.12	-0.48 ± 0.18	-0.50 ± 0.22	-0.47 ± 0.19
B_z	0.17 ± 0.14	0.40 ± 0.12	0.42 ± 0.12	0.48 ± 0.18	0.49 ± 0.21	0.48 ± 0.19
B_y	-0.11 ± 0.14	-0.32 ± 0.13	-0.33 ± 0.13	-0.41 ± 0.19	-0.43 ± 0.22	-0.43 ± 0.20
B	-0.03 ± 0.14	-0.02 ± 0.13	-0.03 ± 0.14	-0.04 ± 0.20	-0.06 ± 0.25	0 ± 0.22
V	-0.25 ± 0.14	-0.33 ± 0.13	-0.34 ± 0.13	-0.30 ± 0.20	-0.28 ± 0.24	-0.26 ± 0.21
N	0.21 ± 0.14	0.25 ± 0.13	0.24 ± 0.13	0.19 ± 0.20	0.18 ± 0.24	0.21 ± 0.21
P	0 ± 0.14	-0.13 ± 0.13	-0.14 ± 0.14	-0.20 ± 0.20	-0.18 ± 0.24	-0.12 ± 0.22
K	0.35 ± 0.08	0.60 ± 0.09	0.60 ± 0.09	0.64 ± 0.11	0.66 ± 0.13	0.68 ± 0.13

процесс магнитного пересоединения привели к геомагнитной буре. Дальнейшее падение B_z привело к ослаблению геомагнитного экранирования и падению значений $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эф}$ на главной фазе бури.

Полученная нами высокая степень влияния E_y на изменения жесткостей геомагнитного обрезания $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эф}$, полученных обоими методами, поддерживает точку зрения, согласно которой азимутальное электрическое поле является одним из самых геоэффективных параметров СВ (см., например, [Burton et al., 1975] и ссылки там). Авторы работы [Vorovsky, Birn, 2014] полагают, что проникновение электрического поля СВ вдоль магнитных силовых линий уже после того, как силовые линии СВ становятся связанными с земной полярной шапкой за счет пересоединения, может стать важным фактором контроля геомагнитных токовых систем на более поздних этапах развития бури.

Таким образом, результаты, полученные двумя принципиально различными методами, показывают хорошее согласие, что повышает доверие к ним.

Найденная разница в ходе изменения наблюдательных $\Delta R_{сгс}$ и модельных $\Delta R_{эф}$ на поздних этапах

бури (см. рис. 1, а, б) требует отдельного рассмотрения. Для наиболее объективного сравнения жесткостей обрезания КЛ, полученных различными способами, необходимо привлечение прямых измерений на спутниках, однако таких работ очень мало. В одном из таких исследований [Adriani et al., 2016] были проведены прямые измерения вариаций жесткостей обрезания КЛ космическим аппаратом PAMELA во время бури 2006 г. Вариации широты обрезания как функции жесткостей обрезания ΔR изучались на относительно коротких интервалах времени, соответствующих орбитальному периоду космического аппарата (~94 мин). Сравнение результатов спутникового эксперимента с жесткостями, полученными с использованием модели Ts96 и более усовершенствованной модели Ts05, показали, что жесткости обрезания (широты обрезания) по спутниковым данным отличаются от модельных $\Delta R_{эф}$. Широта обрезания, полученная при помощи моделей, систематически сдвинута к экватору по отношению к экспериментальным спутниковым данным (на ~21 % для модели Ts96 и на ~18 % для модели Ts05).

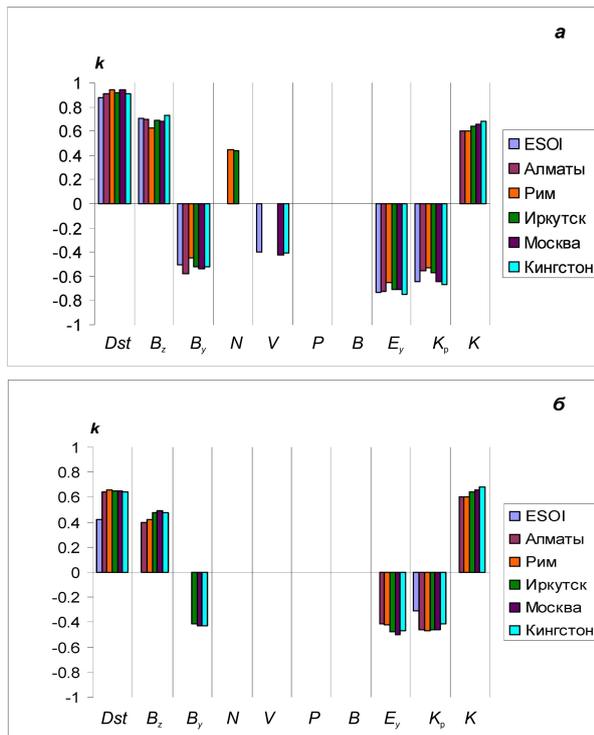


Рис. 3. Диаграммы корреляций изменения геомагнитных порогов КЛ с параметрами ММП, СВ и геомагнитной активности, для которых $|k| \geq 0.4$: а — $\Delta R_{эф}$; б — $\Delta R_{сгс}$

Для исследуемой бури марта 2012 г. значения $\Delta R_{эф}$ уменьшаются на главной фазе, достигают минимума (-0.69 ГВ) в момент максимума бури (9 марта в 08:00 UT), затем на фазе восстановления бури начинают увеличиваться. Что касается значений $\Delta R_{сгс}$, то похожее поведение наблюдается только на низкоширотных станциях (ESOI, Алматы, Рим). На высокоширотных станциях значения $\Delta R_{сгс}$ ведут себя иначе, они продолжают падать еще семь часов после момента максимума бури и достигают минимума (-1.1 ГВ) на ст. Москва 9 марта в 15:00 UT, на восстановительной фазе бури. Таким образом, уменьшение значений $\Delta R_{сгс}$, т. е. подавление геомагнитного экранирования на субавроральных широтах (Москва и Иркутск), на восстановительной фазе бури оказалось вдвое сильнее, чем на главной фазе бури. Такое нестандартное поведение $\Delta R_{сгс}$, по-видимому, связано с тем фактом, что на восстановительной фазе геомагнитной бури была зафиксирована большая суббуревая активность. Согласно работе [Дэспирак и др., 2021], 9 марта в 9:00–16:00 UT наблюдалось резкое увеличение западного электроджета в форме нескольких последовательных очень интенсивных суббурь большой протяженности (суперсуббурь) с амплитудой ~ 2500 нТл. Дэспирак и др. [2021] связывают развитие таких суперсуббурь с вторжением интенсивных потоков заряженных частиц из хвоста магнитосферы. Во время очень интенсивных суббурь возникают токи более 1–2 мА, которые значительно изменяют конфигурацию магнитного поля магнитосферы [Nikolaev et al., 2015]. Возможно, что ослабление геомагнитного экранирования на восстановительной фазе (8:00–15:00 UT) было обусловлено формированием токовой системы суперсуббурь.

Известно, что модель Ts01, созданная на базе спутниковых наблюдений в магнитосфере, способна описать усредненную конфигурацию магнитосферного поля, но она не описывает относительно быстрые динамические процессы, в частности суббури [Пчелкин, 2010; Nikolaev et al., 2015]. Таким образом, подавление геомагнитного экранирования на восстановительной фазе бури во время резкой интенсификации токов западного электроджета не отражается в модельных значениях $\Delta R_{эф}$, тогда как наблюдательные значения $\Delta R_{сгс}$ могут реагировать на различные изменения в магнитном поле магнитосферы на всех широтах. В работе [Дэспирак и др., 2021] отмечена сложность наблюдаемой картины, когда на восстановительной фазе одной суперсуббури происходила фаза развития следующей, из-за чего было трудно выделить отдельные суббури очень большой амплитуды. Два сильных скачка $\Delta R_{сгс}$ 9 марта в $\sim 12:00$ и $15:00$ UT на высоких широтах, по-видимому, отражают эти сложные изменения в конфигурации магнитосферного магнитного поля, обусловленные формированием нескольких последовательных суперсуббурь.

Возможно, что именно различиями в чувствительности к суперсуббурям двух используемых методов объясняется полученная разница в поведении значений $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эф}$ во время восстановительной фазы исследуемой бури. Однако это предположение требует дополнительной проверки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время активного интервала CAUSES-II наблюдались четыре последовательных геомагнитных бури. Мы исследовали уменьшение изменений жесткостей геомагнитного обрезания КЛ во время наиболее сильной бури 8–11 марта 2012 г. и их зависимость от параметров СВ, ММП и геомагнитной активности. Полученная преимущественная корреляция значений ΔR с Dst свидетельствует о том, что вариации геомагнитных порогов во время исследуемой бури контролируются в основном кольцевым током. Кроме того, получена высокая степень корреляции значений ΔR с электромагнитными параметрами B_z и E_y . Динамические параметры СВ практически не оказывают влияния на изменения жесткостей обрезания. Эти выводы получены при использовании принципиально разных методов вычисления значений ΔR , что увеличивает доверие к ним. Особенностью бури является то, что значения $\Delta R_{сгс}$ на высокоширотных станциях достигают минимума не в максимуме бури, как значения $\Delta R_{эф}$, а на семь часов позже, уже на восстановительной фазе. Этот факт, возможно, связан с развитием в это время нескольких суперсуббурь, которые характеризовались большой амплитудой и глобальными пространственными масштабами. Мы предполагаем, что разница в поведении модельных и наблюдательных значений ΔR на восстановительной фазе бури могла возникнуть из-за того, что модель Ts01 описывает усредненную конфигурацию магнитосферного поля, но не индивидуальную суперсуббурю. Однако это предположение требует дополнительного исследования.

Авторы благодарны анонимному рецензенту за замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>] и Уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (Сеть СКЛ) [<https://ckp-rf.ru/usu/433536>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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*. 2020. Т. 60, № 3. С. 40–47. DOI: [10.12737/szf-63202005](https://doi.org/10.12737/szf-63202005).

Дэспирак И.В., Любчик А.А., Клейменова Н.Г. и др. Долготные геомагнитные эффекты суперсуббури во время магнитной бури 9 марта 2012 г. *Известия РАН. Серия физическая*. 2021. Т. 85, № 3. С. 346–352. DOI: [10.31857/S0367676521030108](https://doi.org/10.31857/S0367676521030108).

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/S0016794019050092](https://doi.org/10.1134/S0016794019050092).

Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И. Корреляция жесткости обрезания космических лучей с параметрами гелиосферы и геомагнитной активности на разных фазах магнитной бури в ноябре 2004 г. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020. Т. 60, № 3. С. 281–292. DOI: [10.31857/S0016794020020145](https://doi.org/10.31857/S0016794020020145).

Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Динамика жесткости обрезания космических лучей и параметров магнитосферы во время разных фаз бури 20 ноября 2003 г. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2021. Т. 61, № 2. С. 160–171. DOI: [10.31857/S0016794021010120](https://doi.org/10.31857/S0016794021010120).

Пчелкин В.В. Влияние магнитосферных суббурь на асимптотические направления прихода релятивистских протонов космических лучей. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2010. Т. 50, № 3. С. 328–333.

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

Akasofu S.I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. *Space Sci. Rev.* 1981. Vol. 28. P. 121–190. DOI: [10.1007/BF00218810](https://doi.org/10.1007/BF00218810).

Belov A., Vaisultanova L., Eroshenko E., et al. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, A09S20. DOI: [10.1029/2005JA011067](https://doi.org/10.1029/2005JA011067).

Borovsky J.E., Birn J. The solar wind electric field does not control the dayside reconnection rate. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. Vol. 119. DOI: [10.1002/2013JA019193](https://doi.org/10.1002/2013JA019193).

Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.J. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst*. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. P. 4204–4214.

Carlsaw K.S., Harrison R.G., Kirkby J. Cosmic rays, clouds, and climate. *Science*. 2002. Vol. 298, iss. 5599. P. 1732–1737. DOI: [10.1126/science.1076964](https://doi.org/10.1126/science.1076964).

Dorman L.I. *Elementary Particle and Cosmic Ray Physics*. New York, Elsevier, 1963. 456 p.

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

Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Diagnostics of the electromagnetic characteristics of the interplanetary medium based on cosmic ray effects. *Geomagn. Aeron.* 2013. Vol. 53, iss. 4. P. 430–440.

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. 20th Int. Conf. Cosmic Rays*. Moscow, 1987. Vol. 4. P. 2016–2020.

Kress B.T., Mertens C.J., Wiltberger M. Solar energetic particle cutoff variations during the 29–31 October 2003 geomagnetic storm. *Space Weather*. 2010. Vol. 8, S05001. DOI: [10.1029/2009SW000488](https://doi.org/10.1029/2009SW000488).

Makrantonis P., Mavromichalaki H., Usoskin I., Papaioannou A. Calculation of the cosmic ray induced ionization for the region of Athens. *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. Vol. 409, iss. 1, 012232. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012232](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012232).

Nikolaev A.V., Sergeev V.A., Tsyganenko N.A., et al. A quantitative study of magnetospheric magnetic field line deformation by a two-loop substorm current wedge. *Ann. Geophys.* 2015. Vol. 33. P. 505–517. DOI: [10.5194/angeo-33-505-2015](https://doi.org/10.5194/angeo-33-505-2015).

Russell C.T. The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: A tutorial. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2000. Vol. 28, no. 6. P. 1818–1830. DOI: [10.1109/27.902211](https://doi.org/10.1109/27.902211).

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. P. 4117–4130.

Tsurutani B., Echer E., Shibata K., et al. The interplanetary causes of geomagnetic activity during the 7–17 March 2012 interval: a CAUSES II overview. *J. Space Weather Space Climate*. 2014. Vol. 4, A02. DOI: [10.1051/swsc/2013056](https://doi.org/10.1051/swsc/2013056).

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](https://doi.org/10.1029/2002JA009808).

URL: <http://www01.nmdb.eu/data> (дата обращения 20 февраля 2023 г.).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 3 июля 2015 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 20 февраля 2023 г.).

URL: <https://ckp-rf.ru/usu/433536> (дата обращения 20 февраля 2023 г.).

Статья подготовлена по материалам Восемнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 6–10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

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).