

**ВОЗМУЩЕННАЯ МАГНИТОСФЕРА 7–8 НОЯБРЯ 2004 г.
И ВАРИАЦИИ ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ:
ШИРОТНЫЕ ЭФФЕКТЫ**

**DISTURBED MAGNETOSPHERE ON NOVEMBER 7–8, 2004
AND VARIATIONS OF COSMIC RAY CUTOFF RIGIDITY: LATITUDE 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, 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, sdobnov@iszf.irk.ru*

O.A. Danilova

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

N.G. Ptitsyna

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

M.I. Tyasto

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

V.E. Sdobnov

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

Аннотация. Мы изучили особенности широтного поведения жесткости обрезания космических лучей, а также их чувствительности к B_z - и B_y -компонентам межпланетного магнитного поля и индексам геомагнитной активности Dst и K_p во время различных фаз магнитной бури 7–8 ноября 2004 г. Жесткости обрезания рассчитаны двумя методами: спектрографической глобальной съемки по наблюдательным данным регистрации космических лучей мировой сети станций и методом, в котором траектории частиц космических лучей вычисляются численно в модельном магнитном поле магнитосферы. Найдено, что чувствительность наблюдательных жесткостей обрезания к Dst меняется с широтой (пороговой жесткостью станций наблюдения) в антифазе с изменениями чувствительности к B_y . Во время восстановительной фазы бури корреляция Dst с B_y существенно больше, чем с B_z , а корреляция K_p больше с B_z , чем с B_y . Показано, что преимущественный вклад в развитие токовых систем, определяющих эволюцию Dst на восстановительной фазе бури, вносит B_y -компонента.

Ключевые слова: жесткость геомагнитного обрезания, B_y , B_z , межпланетное магнитное поле, индексы геомагнитной активности, фазы магнитной бури.

Abstract. We have studied the latitude behavior of cosmic ray cutoff rigidity and their sensitivity to B_z and B_y components of the interplanetary magnetic field and geomagnetic activity indices Dst and K_p for different phases of the November 7–8, 2004 strong magnetic storm. Cutoff rigidities have been calculated using two methods: the spectrographic global survey method in which the cutoff rigidity is determined from observational data, acquired by the neutron monitor network, and the method in which particle trajectories are calculated numerically in a model magnetic field of the magnetosphere. We have found that the sensitivity of observed cutoff rigidities to Dst changes with latitude (threshold rigidity of stations) is in antiphase with changes in the sensitivity to B_y . During the recovery phase of the storm, the Dst correlation with B_y is significantly greater than that with B_z , and the K_p correlation with B_z is greater than that with B_y . The B_y component is shown to be a predominant driver of the current systems that determine the Dst evolution during the recovery phase.

Keywords: cutoff rigidity, B_y , B_z , interplanetary magnetic field, geomagnetic activity indices, magnetic storm phases.

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитное поле разрешает или запрещает приход частиц космических лучей (КЛ) в данную точку в магнитосфере и атмосфере в зависимости от их энергии. Самая низкая широта, до которой энергичные частицы могут проникать, известна как широта обрезания. Эта широта является функцией жесткости обрезания (момент на единицу заряда). Жесткость R геомагнитного обрезания — пороговая жесткость, ниже которой поток частиц равен нулю из-за геомагнитного экранирования. Распределение по широте и долготе жесткости обрезания определяется пространственной структурой и интенсивностью магнитосферного магнитного поля, которое меняет направление движения КЛ. Свойства магнитного экрана сильно меняются во времени в зависимости от динамического взаимодействия магнитных и электрических полей солнечного ветра с внутри-магнитосферными полями и токами. Особенно значительные изменения в токах, плазме и магнитном поле магнитосферы происходят во время геомагнитной бури [Leske et al., 2001].

Знание распределения изменений жесткостей обрезания КЛ ΔR в течение магнитной бури становится все более актуальным для учета последствий плохой космической погоды для космонавтики и бурно развивающихся в последние 15 лет высокоширотных авиаперевозок [Iucci et al., 2005; Бузов и др., 2005; Kress et al., 2015]. Долготные и широтные зависимости вариаций жесткостей обрезания в спокойные периоды и во время отдельных магнитных бурь рассматривались в ряде статей [Dorman, 1963; Flueckiger et al., 1987; Antonova et al., 1990; Belov et al., 2005; Dvornikov et al., 2009; Данилова и др., 2019]. Однако широтные зависимости чувствительности жесткостей обрезания к различным параметрам магнитосферы оставались за рамками этих исследований.

В данной работе мы провели исследование широтной зависимости ΔR , а также широтных эффектов в корреляции ΔR с изменениями межпланетного магнитного поля (ММП) и геомагнитной активности для бури 7–8 ноября 2004 г. Связь вариаций жесткостей обрезания с параметрами магнитосферы на интервале всего магнитосферного возмущения 7–11 ноября 2004 г. и отдельно в период первой бури 7–8 ноября рассматривалась в наших работах [Tyasto et al., 2013; Птицына и др., 2019]. Новым аспектом данного исследования является то, что мы остановились на анализе именно широтных эффектов, причем во время каждой из трех фаз бури: на предварительном этапе, на главной и восстановительной фазах бури 7–8 ноября.

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Вариации жесткостей обрезания ΔR были вычислены при помощи наблюдательного метода спектрографической глобальной съемки, в котором жесткости обрезания $R_{\text{сгс}}$ определяются по наблюдательным данным сети нейтронных мониторов, и который подробно описан в [Dvornikov et al., 2013], и модельного метода, в котором для определения жесткостей обрезания $R_{\text{эф}}$ численно рассчитываются траектории частиц в модельном магнитном поле магнитосферы [Shea et al., 1965]. Мы использовали

магнитосферную модель Ts01 [Tsyganenko et al., 2003] для сильных магнитных возмущений, о чем подробно писали авторы в более ранних работах (например [Tyasto et al., 2013]).

$\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ определялись как разности между значениями геомагнитных порогов, рассчитанными для каждого часа в период бури, и значениями в спокойный период 6 ноября 2004 г. Выбор спокойного периода обусловлен тем, что в это время электромагнитная обстановка в межпланетном пространстве и геомагнитная обстановка были спокойными, а спектр галактических КЛ наименее модулирован.

Коэффициенты корреляции k между жесткостями обрезания и параметрами ММП вычислялись для следующих станций: Токио (35.75° N, 139.72° 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 Хобарт (42.90° S, 147.33° E). Станции выбирались таким образом, чтобы они в спокойное время охватывали основную область пороговых жесткостей $R_{\text{с}}$, подверженных влиянию геомагнитного поля: Токио — 11.0 ГВ, Алматы — 6.18 ГВ, Рим — 6.10 ГВ, Иркутск — 3.25 ГВ, Москва — 2.12 ГВ, Хобарт — 1.76 ГВ. Пороговые жесткости станций $R_{\text{с}}$ рассчитывались как среднее за спокойные сутки 6 ноября 2004 г.

При вычислении наблюдательных изменений пороговых жесткостей геомагнитного обрезания использовались данные мировой сети станций КЛ [<http://www01.nmdb.eu/data/>].

Коэффициенты корреляции k и стандартные ошибки получены из анализа регрессионных уравнений отдельно по выборкам наблюдений для периодов каждой из трех фаз — предварительной, главной и восстановительной.

Данные о параметрах ММП и геомагнитной активности взяты на сайте [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>].

С учетом особенностей развития бури [Ермолаев и др., 2014; Tsurutani et al., 2008] ее можно разбить на три фазы: предварительная, т. е. период перед бурей с 03:00 по 19:00 UT 7 ноября, главная с 20:00 UT 7 ноября по 06:00 UT 8 ноября, фаза восстановления с 07:00 по 24:00 UT 8 ноября.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 показаны примеры широтного поведения вариаций геомагнитных порогов $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ в зависимости от пороговых жесткостей $R_{\text{с}}$ используемых станций для нескольких моментов времени в течение бури. Видно, что во время предварительной фазы в момент, когда $Dst = 7$ нТл, жесткость $R_{\text{сгс}}$ (панель *a*) не меняется с широтой (или жесткостью станции). Для главной и восстановительной фаз широтная кривая принимает типичную форму с максимумом падения жесткости обрезания на среднеширотных станциях [Dorman, 1963; Flueckiger et al., 1987; Dvornikov et al., 2009]. При этом максимум на главной фазе достигается при $R_{\text{с}} \approx 3$ ГВ, а на восстановительной он сдвигается к $R_{\text{с}} \approx 6 \div 7$ ГВ, т. е. к более низким широтам.

Видно (*b*), что на предварительной фазе $\Delta R_{\text{эф}}$, так же как и $\Delta R_{\text{сгс}}$, практически не меняется с широтой. На главной и восстановительной фазах широтные зави-

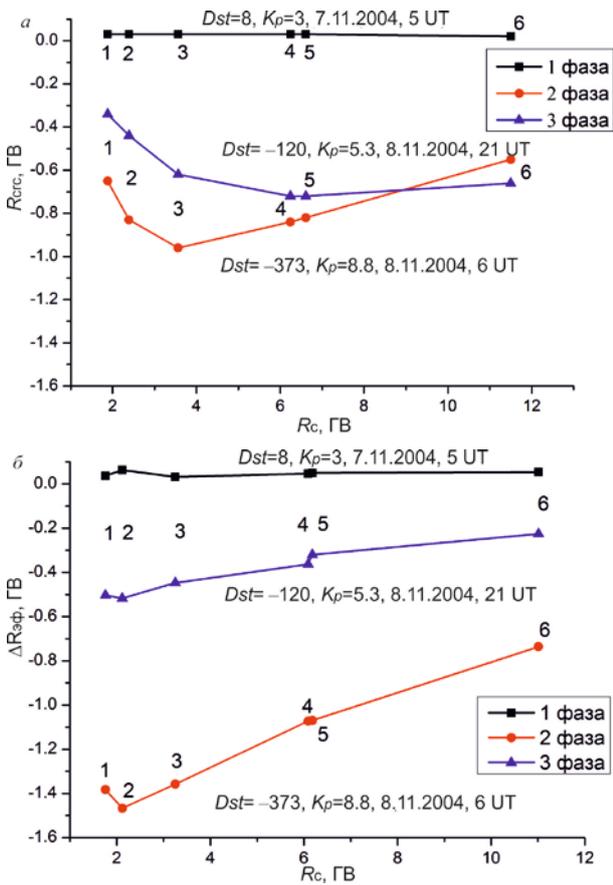


Рис. 1. Изменения $\Delta R_{сгс}$ (а) и $\Delta R_{эф}$ (б) в зависимости от пороговой жесткости станции R_c для различных фаз бури: 1 фаза — предварительной, 2 фаза — главной, 3 фаза — восстановительной. Станции обозначены в порядке убывания широты: 1 — Хобарт, 2 — Москва, 3 — Иркутск, 4 — Рим, 5 — Алматы, 6 — Токио

симости $\Delta R_{эф}$ отличаются от широтных зависимостей $\Delta R_{сгс}$ главным образом тем, что не показывают характерной кривой с максимумом падения жесткостей на средних широтах. На главной и восстановительной фазах наблюдается монотонный рост $\Delta R_{эф}$ с увеличением пороговой жесткости станции, т. е. с уменьшением широты станций, с неявным максимумом при $R_c \approx 2$ ГВ. Наибольшее расхождение кривых $\Delta R_{сгс}(R_c)$ и $\Delta R_{эф}(R_c)$ наблюдается на восстановительной фазе. На главной фазе для $R_c \geq 3$ ГВ поведение кривой $\Delta R_{сгс}(R_c)$ аналогично поведению $\Delta R_{эф}(R_c)$, но наблюдается значительная разница в величине ΔR . Сравнение панелей а, б показывает, что на главной фазе при достижении максимума бури ($Dst = -373$ нТл), максимальное падение жесткости $\Delta R_{эф} = -1.5$ ГВ, что в полтора раза больше, чем $\Delta R_{сгс} = -0.96$ ГВ. Такая значительная разница не отмечается для предварительной и восстановительной фаз. Следует отметить, что в обоих случаях видно, что падение жесткости в зависимости от широты (или R_c) усиливается с увеличением $|Dst|$.

С учетом этих результатов дальнейшее исследование мы провели для наблюдательных значений $\Delta R_{сгс}$, а также остановились только на главной и восстановительной фазах бури. Мы вычислили коэффициенты корреляции k между значениями $\Delta R_{сгс}$ и параметрами ММП и геомагнитной активности для главной фазы и фазы восстановления на шести выбранных для исследования станциях и проследили

эти взаимосвязи в зависимости от пороговой жесткости станций. Коэффициенты k и стандартная ошибка регрессии σ представлены в таблице.

На рис. 2 показаны коэффициенты k между значениями $\Delta R_{сгс}$ и Dst , K_p , B_y и B_z в зависимости от станции наблюдения для главной и восстановительной фаз. Они показывают интересные особенности. Корреляция $\Delta R_{сгс}$ и Dst растет а $\Delta R_{сгс}$ и B_y падает с уменьшением пороговой жесткости станции. Таким образом, широтная зависимость k для связи $\Delta R_{сгс}$ и Dst зеркально повторяет широтную кривую k для связи $\Delta R_{сгс}$ и B_y . Широтная зависимость k для связи с K_p зеркально повторяет широтную кривую k для связи с B_z . Наиболее ярко эта картина проявляется для фазы восстановления (панель б). Для этого периода широтная кривая k для связи $\Delta R_{сгс}$ и Dst практически совпадает с широтной кривой $|k|$ для связи с B_y . Аналогично широтная кривая k для связи с K_p практически совпадает с широтной кривой $|k|$ для B_z . Кроме того, на фазе восстановления k между $\Delta R_{сгс}$ и Dst растет с увеличением широты станции, в то время как изменения корреляции между $\Delta R_{сгс}$ и K_p носят более сложный характер. На главной фазе зависимость корреляции $\Delta R_{сгс}$ и K_p от пороговой жесткости станции представляет собой слабо выраженную волну, которая находится в противофазе с аналогичной волной для k между $\Delta R_{сгс}$ и B_z .

Исходя из результатов, представленных на рис. 2, можно предположить, что во время исследуемой бури поведение Dst контролировалось в большой степени B_y -компонентой ММП, а K_p — B_z -компонентой. Чтобы проверить это предположение, мы провели корреляционный анализ между параметрами ММП и индексами геомагнитной активности на разных фазах бури, результаты которого показаны на рис. 3.

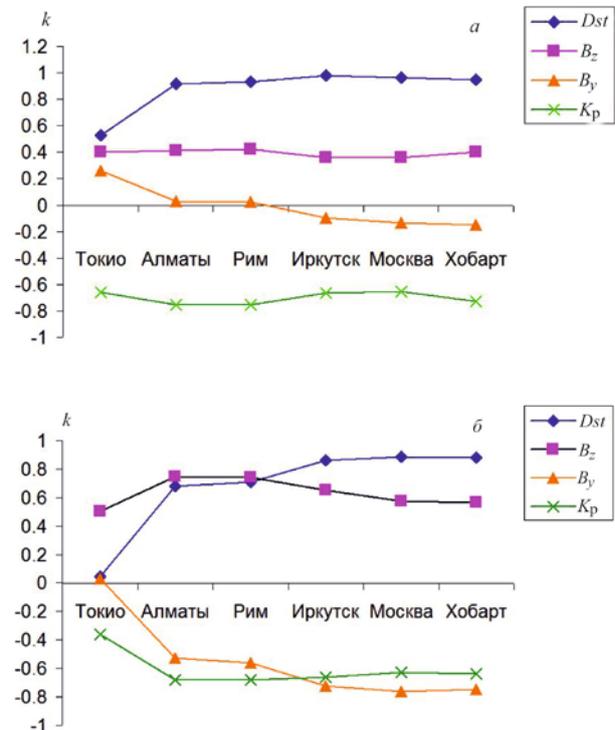


Рис. 2. Широтная зависимость коэффициентов корреляции k между $\Delta R_{сгс}$ и параметрами ММП и геомагнитной активности для главной фазы бури (а) и фазы восстановления (б). Станции идут в порядке возрастания широты

Коэффициенты корреляции значений $\Delta R_{\text{сгс}}$ и Dst , K_p , B_y , B_z в зависимости от станции наблюдения для главной и восстановительной фаз

	главная фаза/восстановительная фаза							
	Dst	σ	B_z	σ	B_y	σ	K_p	σ
Токио	0.53/0.05	0.14/0.14	0.40/0.50	0.15/0.12	0.26/0.03	0.16/0.14	-0.66/-0.36	0.13/0.13
Алматы	0.92/0.68	0.10/0.12	0.42/0.75	0.22/0.11	0.03/-0.53	0.24/0.14	-0.75/-0.68	0.16/0.12
Рим	0.93/0.71	0.09/0.12	0.43/0.74	0.23/0.12	0.03/-0.56	0.25/0.15	-0.75/-0.68	0.17/0.13
Иркутск	0.97/0.86	0.08/0.12	0.36/0.65	0.31/0.18	-0.10/-0.72	0.33/0.17	-0.67/-0.66	0.25/0.18
Москва	0.97/0.89	0.08/0.09	0.36/0.58	0.28/0.17	-0.13/-0.76	0.30/0.13	-0.66/-0.63	0.23/0.16
Хобарт	0.95/0.88	0.07/0.06	0.40/0.57	0.21/0.10	-0.15/-0.75	0.22/0.09	-0.73/-0.64	0.16/0.10

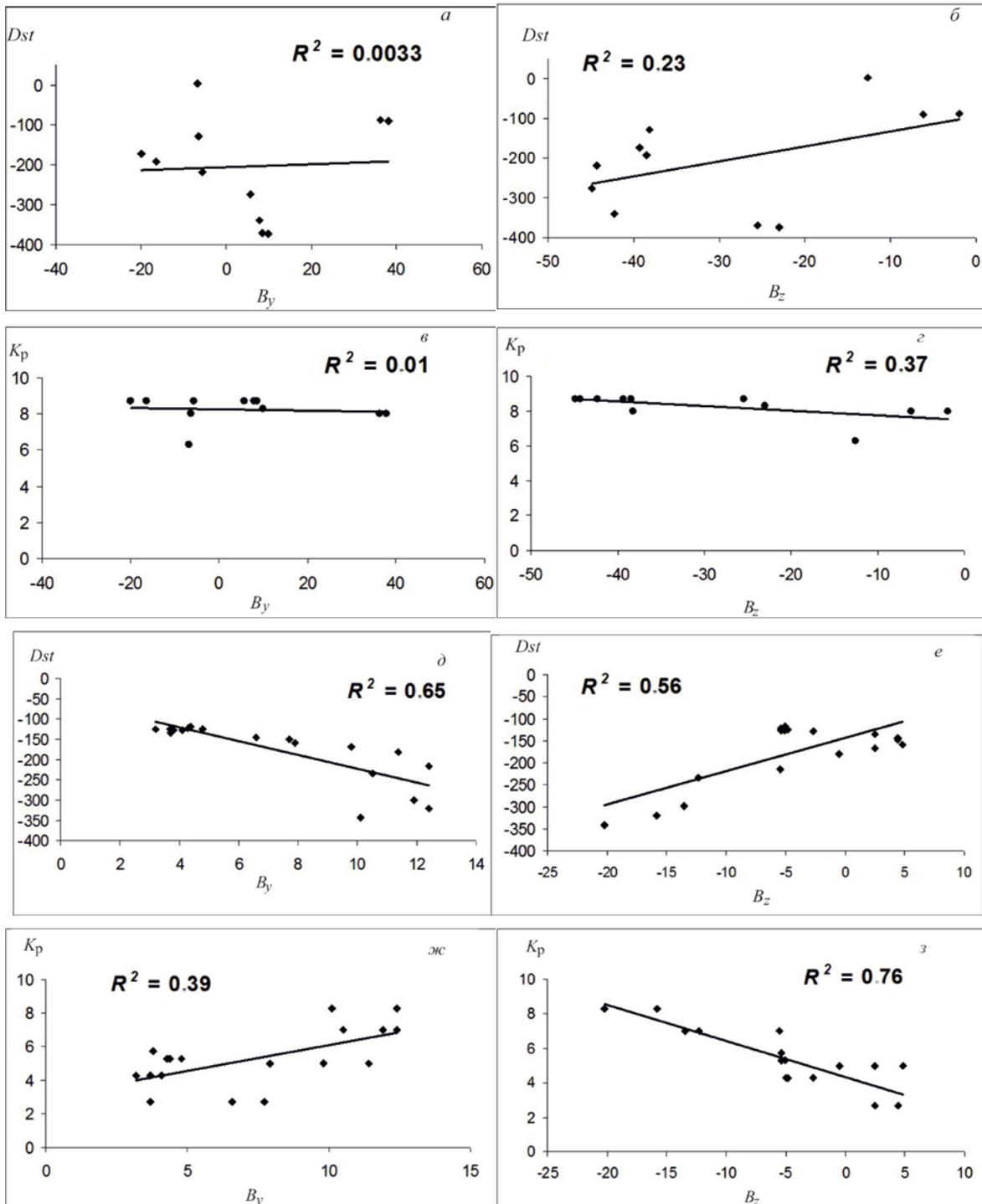


Рис. 3. Диаграммы рассеяния для главной (а-г) и восстановительной фаз бури (е-з). Линейный тренд показан прямой линией, R^2 — достоверность аппроксимации

Диаграммы рассеяния для главной фазы ($a-z$) показывают, что корреляция между индексами геомагнитной активности (Dst и K_p) и компонентами ММП (B_y , B_z) сравнительно низкая. Отметим, что, хотя видна достаточно заметная корреляция (b) между Dst и B_z (0.46), точки на диаграммах рассеяния для Dst (a , b) расположены хаотично. Лишь диаграммы рассеяния (z) показывают существенную зависимость K_p от B_z (-0.60). В период восстановления связь между K_p и B_z усиливается. Видно, что в период восстановления ($d-z$) коэффициенты корреляции как между K_p и B_z (0.87), так и между Dst и B_y (0.81) высоки. Однако корреляция между Dst и B_z (0.75), а также между K_p и B_y (0.62) несколько меньше.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для главной и восстановительной фаз исследуемой магнитной бури широтная кривая $\Delta R_{\text{сгс}}(R_c)$ принимает классическую форму с максимумом падения жесткости обрезания на среднеширотных станциях. При этом максимум падения жесткостей на главной фазе достигается при $R_c \approx 3$ ГВ, что в целом совпадает с обычно наблюдаемой картиной. На восстановительной фазе максимум сдвигается к $R_c \approx 6 \div 7$ ГВ, т. е. к более низким широтам. Это значение R_c , при котором наблюдается максимум падения жесткостей, близко к $R_c \approx 7 \div 8$ ГВ, полученной для очень сильной бури в ноябре 2003 г. [Belov et al., 2005]. Широтные зависимости модельных $\Delta R_{\text{эф}}(R_c)$ отличаются от широтных зависимостей наблюдательных $\Delta R_{\text{сгс}}(R_c)$ по величине. Кроме того, они не представляют характерной кривой с максимумом падения жесткостей на среднеширотных станциях. В работе [Belov et al., 2005] при исследовании бури в ноябре 2003 г. найдено также, что для $R_c < 6$ ГВ широтные зависимости, полученные с использованием модели Ts01, сильно отличаются от зависимостей, полученных с использованием данных нейтронных мониторов. Можно заключить, что модель Ts01, которая специально была разработана для возмущенных состояний магнитосферы, тем не менее не может отразить в полной мере пространственную конфигурацию возмущенной магнитосферы во время супербури и, в частности, во время исследуемой бури.

Этот вывод согласуется с результатами работы [Kudela, Bucik, 2005], в которой сравнивались жесткости обрезания, вычисленные траекторным методом при помощи различных магнитосферных моделей во время нескольких бурь, в том числе 7–8 ноября 2004 г., с результатами наблюдений на нейтронных мониторах и космическом аппарате CORONAS-F. Авторы этой работы утверждают, что для интенсивных бурь результаты для средних широт, полученные с использованием модели Ts01, могут значительно отличаться от наблюдений.

Наш результат, состоящий в том, что B_y -компонента ММП играет важную роль в широтном распределении ΔR , а также во взаимосвязи геомагнитной активности с компонентами ММП во время исследуемой бури, особенно на ее восстановительной фазе, заслуживает более подробного рассмотрения.

Связь индексов геомагнитной активности с параметрами межпланетной среды исследовалась в многочисленных работах, в том числе и для периодов магнитных бурь [Dungey, 1961; Burton et al., 1975; Russell, 2000; Newel et al., 2007; Borovsky, 2014; Borovsky, Birn, 2014; и ссылки в них]. Было установлено, что одним из самых геоэффективных параметров ММП является его южная компонента $B_z < 0$, рост которой вызывает пересоединение магнитного поля солнечного ветра и поля магнитосферы. Однако в работах [Daglis et al., 1999; Gosling et al., 1985; Crooker, 2000; Park et al., 2006; Rawat et al., 2007] было найдено, что B_y -компонента при определенных условиях в магнитосфере также может оказывать значительное влияние на пересоединение. В частности, в работе [Rawat et al., 2007] найдено, что B_y -компонента ММП играет существенную роль в развитии интенсивной бури в присутствии южной компоненты B_z . Конфигурация ММП, при которой $B_y > 0$ и $B_z < 0$, является наиболее геоэффективной. Для исследуемой бури отрицательные значения $B_z < 0$ наблюдались практически на всем протяжении главной и восстановительной фаз начиная с 21:00 UT 7 ноября, но положительная $B_y > 0$ в течение продолжительного времени (больше 18 ч) фиксировалась лишь на восстановительной фазе.

Тот факт, что полученные широтные зависимости $\Delta R_{\text{сгс}}$ от геомагнитных индексов Dst и K_p находятся в противофазе, объясняется, по-видимому, тем, что эти зональные индексы определяются различным образом и отражают поведение различных токовых систем. Dst определяется по вариациям наземного магнитного поля на низкоширотных станциях (18° – 35°) и отражает эффект экваториального кольцевого тока. Кроме того, в Dst также вносят вклад частичный кольцевой ток [Liemohn et al., 2001], поперечные токи хвоста [DuByagin et al., 2014; Ohtani et al., 2001; Turner et al., 2000] и токи на магнитопаузе [Burton et al., 1975; Siscoe et al., 2005]. Dst не описывает динамику частиц радиационных поясов [Reeves et al., 2003], в то время как K_p , напротив, с ней тесно связан [Borovsky, Shprits, 2017]. K_p определяется по субавроральным станциям (44° – 62°). Из-за зависимости этого индекса от ширины области авроральных токов (например, [Feldshtein, Starkov, 1962]) K_p может служить мерой магнитосферной конвекции [Thomsen, 2004]. Во время сильного магнитного возмущения, когда авроральный овал смещается к югу, станции, входящие в сеть K_p , начинают фиксировать эффекты магнитосферных токов, текущих в области высоких широт. Эти токи контролируются вертикальной компонентой B_z [Potemra, 1987]. Таким образом, можно предположить, что на восстановительной фазе бури 7–8 ноября 2004 г. вариации жесткости обрезания $\Delta R_{\text{сгс}}$ регулировались распадом как кольцевого тока, так и высокоширотных токовых систем, при этом влияние последних было более значительным.

ВЫВОДЫ

Мы рассмотрели широтные особенности изменений модельных и наблюдательных геомагнитных

порогов на трех фазах бури 7–8 ноября 2004 г.: предварительной, главной и восстановительной. Получены следующие результаты.

1. Во время главной и восстановительной фаз широтная кривая $\Delta R_{\text{сгс}}(R_c)$ принимает классическую форму с максимумом падения жесткости обрезания на среднеширотных станциях ($R_c \approx 3$ ГВ). На восстановительной фазе максимум двигается к $R_c \approx 6 \div 7$ ГВ, т. е. к более низким широтам. Широтное распределение модельных $\Delta R_{\text{эф}}$ существенно отличается от распределения наблюдательных $\Delta R_{\text{сгс}}$, особенно для средних и низких широт.

2. Наши результаты свидетельствуют о том, что для магнитной бури 7–8 ноября 2004 г. модель магнитосферы Ts01 недостаточно адекватно отражает пространственную конфигурацию возмущенной магнитосферы, причем расхождение отличается на разных фазах бури.

3. На главной и восстановительной фазах бури широтная зависимость $\Delta R_{\text{сгс}}$ от Dst находится в антифазе с широтной зависимостью $\Delta R_{\text{сгс}}$ от B_y ; широтная зависимость $\Delta R_{\text{сгс}}$ от K_p меняется в антифазе с широтной зависимостью $\Delta R_{\text{сгс}}$ от B_z . Эти широтные эффекты наиболее четко проявляются на фазе восстановления.

4. На фазе восстановления корреляция Dst с B_y выше, чем с B_z , а корреляция K_p с B_y , наоборот, ниже, чем с B_z .

Наши результаты свидетельствуют о том, что во время магнитной бури 7–8 ноября 2004 г. преимущественный вклад в развитие токовых систем, определяющих эволюцию Dst на восстановительной фазе бури, вносит не B_z -компонента, а B_y . Индекс K_p , напротив, в большей степени зависит от B_z -компоненты. Связь вариаций жесткости обрезания $\Delta R_{\text{сгс}}$ с Dst - и K_p и их связь с компонентами ММП B_y и B_z обусловлены относительным вкладом различных токовых систем. Наши результаты позволяют заключить, что во время бури, особенно на ее восстановительной фазе, наблюдательные $\Delta R_{\text{сгс}}$ отражали эффекты как кольцевого тока, так и высокоширотных токовых систем, при этом вклад последних был более значительным.

Работа частично выполнена в рамках базового финансирования Программы фундаментальных научных исследований П.16. Использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://сКр-rf.ru/сКр/3056/>] и научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Буров В.А., Мелешков Ю.С., Очелков Ю.П. Методика оперативной оценки уровня радиационной опасности, обусловленной возмущениями космической погоды, при авиаперевозках // Гелиогеофиз. иссл. 2014. Вып. 7. С. 61–81.

Данилова О.А., Демина И.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И. Картирование жесткости обрезания космических лучей во время главной фазы магнитной бури 20 ноября 2003 г. // Геомагнетизм и аэрномия. 2019. Т. 59, № 2. С. 160–167.

Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Изменения жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в отдельных пунктах Азиатского региона в период экстремальных событий 2003 г. // Солнечно-земная физика. 2009. Вып. 14. С. 23–26.

Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др. Год спустя: солнечные и гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45, № 6. С. 681–719.

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 Аэрномия. 2019. Т. 59. № 5. С. 569–577. DOI: [10.1134/S0016793219050098](https://doi.org/10.1134/S0016793219050098).

Antonova O.F., Baisultanova L.M., Belov A.V., et al. The longitude and latitude dependences of the geomagnetic cutoff rigidity variations during strong magnetic storms // Proc. 21st International Cosmic Ray Conference. January 1990. Adelaide, Australia. V. 7. P. 10–13.

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

Borovsky J.E. Canonical correlation analysis of the combined solar wind and geomagnetic index data sets // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. P. 5364–5381. DOI: [10.1002/2013JA019607](https://doi.org/10.1002/2013JA019607).

Borovsky J.E., Birn J. The solar wind electric field does not control the dayside reconnection rate // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. P. 751–760. DOI: [10.1002/2013JA019193](https://doi.org/10.1002/2013JA019193).

Borovsky J.E., Shprits Y. Is the Dst index sufficient to define all geospace storms? // J. Geophys. Res. 2017. V. 122. Iss. 11. P. 11543–11547.

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

Crooker N.U. Solar and heliospheric geoeffective disturbances // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2000. V. 62. P. 1071–1085.

Daglis I.A., Thorne R.M., Baumjohann W., Orsini S. The terrestrial ring current: Origin, formation, evolution, and decay // Rev. Geophys. 1999. V. 37. P. 407–438.

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

Dubyagin S., Ganushkina N., Kubyshkina M., Liemohn M. Contribution from different current systems to SYM and ASY midlatitude indices // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. P. 7243–7263. DOI: [10.1002/2014JA020122](https://doi.org/10.1002/2014JA020122).

Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 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 // Geomagnetism and Aeronomy. 2013. V. 53. Iss. 4. P. 430–440.

Feldstein Y.I., Starkov G.V. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances // Planetary and Space Sci. 1967. V. 15. Iss. 2. P. 209–229. DOI: [10.1016/0032-0633\(67\)90190](https://doi.org/10.1016/0032-0633(67)90190).

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 International Cosmic Ray Conference. Moscow. 1987. V. 4. P. 216.

Gosling J.T., Baker D.N., Bame S.J., et al. North-south and dawn-dusk plasma asymmetries in the distant tail lobes: ISEE-3 // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1985. V. 90. Iss. A7. P. 6354–6360. DOI: [10.1029/JA090iA07p06354](https://doi.org/10.1029/JA090iA07p06354).

Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V., et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // Space Weather. 2005. V. 3. S01001. DOI: [10.1029/2003SW000056](https://doi.org/10.1029/2003SW000056).

Kress B.T., Hudson M.K., Selesnick R.S., et al. Modeling geomagnetic cutoffs for space weather applications // J. Geophys. Res. 2015. V. 120, N 7. P. 5694–5702. DOI: [10.1002/2014JA020899](https://doi.org/10.1002/2014JA020899).

Kryakunova O.N., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Variations of the cosmic ray cutoff rigidity in Irkutsk and Almaty during the extreme events in 2003 // Proc. 31st International Cosmic Ray Conference. July 2009. Lod'z. P. 3414–3418.

Kudela K., Bucik R. Low energy cosmic rays and the disturbed magnetosphere // Proc. 2nd International Symposium SEE-2005. Nor-Amberd, Armenia. 2005. P. 57–62. <https://arxiv.org/pdf/1303.4052.pdf>.

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. V. 106. P. 30011–30022. DOI: 10.1029/2000JA000212.

Liemohn M.W., Kozyra J.U., Thomsen M.F., et al. Dominant role of the asymmetric ring current in producing stormtime Dst^* // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N A6. P. 10,883–10,904. DOI: 10.1029/2000JA000326.

Newel P.T., Sotirelis T., Liou K., et al. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, A01206. DOI: 10.1029/2006JA012015.

Ohtani S., Nose M., Rostoker G., et al. Storm-substorm relationship: Contribution of the tail current to Dst // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N A10. P. 21199–21209. DOI: 10.1029/2000JA000400.

Park K.S., Ogino T., Walke R.J. On the importance of antiparallel reconnection when the dipole tilt and IMF B_y are nonzero // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, A05202. DOI: 10.1029/2004JA010972.

Potemra T.A. Birkeland currents in the Earth's magnetosphere // Astrophys. Space Sci. 1988. V. 144, N 1-2. P. 155–169.

Rawat R., Alex S., Lakhina G.S. Geomagnetic storm characteristics under varied interplanetary conditions // Bull. Astron. Soc. India. 2007. V. 35. P. 499–509.

Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., et al. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, N 10. P. 1529–1544. DOI: 10.1029/2002GL016513.

Russell C.T. The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: A tutorial // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28, N 6. P. 1818–1830. DOI: 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. V. 70. P. 4117–4130.

Siscoe G.L., McPherron R.L., Jordanova V.K. Diminished contribution of ram pressure to Dst during magnetic storms // J. Geophys. Res. 2005. V. 110 P. A12227. DOI: 10.1029/2005JA011120.

Thomsen M.F. Why K_p is such a good measure of magnetospheric convection // Space Weather. 2004. V. 2. S11044. DOI: 10.1029/2004SW000089.

Tsurutani B.T., Echer E., Guarnieri F.L., Kozyra J.U. CAUSES November 7–8, 2004, superstorm: Complex solar and interplanetary features in the post-solar maximum phase // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35, N 6. P. 1–6. DOI: 10.1029/2007GL031473.

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. V. 108, A5. P. 1209–1224.

Turner N.E., Baker D.N., Pulkkinen T.I., McPherron R.L. Evaluation of the tail current contribution to Dst // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, A3. P. 5431–5439. DOI: 10.1029/1999JA000248.

Tyasto M.I., Danilova O.A., Ptitsyna N.G., Sdobnov V.E. Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the great geomagnetic storm of November 2004 // Adv. Space Res. 2013. V. 51. Iss. 7. P. 1230–1237.

REFERENCES

Antonova O.F., Baisultanova L.M., Belov A.V., Dorman L.I., Yanke V.G. The longitude and latitude dependences of the geomagnetic cutoff rigidity variations during strong magnetic storms. Proc. 21st International Cosmic Ray Conference. January 1990. Adelaide, Australia. 1990, vol. 7, pp. 10–13.

Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V., Pchelkin V., Plainaki, C., Mariatos G. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003. J. Geophys. Res. 2005, vol. 110, A09S20. DOI: 10.1029/2005JA011067.

Borovsky J.E. Canonical correlation analysis of the combined solar wind and geomagnetic index data sets. J. Geophys. Res. 2014, vol. 119, pp. 5364–5381. DOI: 10.1002/2013JA019607.

Borovsky J.E., Birn J. The solar wind electric field does not control the dayside reconnection rate. J. Geophys. Res. Space Physics. 2014, vol. 119, pp. 751–760. DOI: 10.1002/2013JA019193.

Borovsky J.E., Shprits Y. Is the Dst index sufficient to define all geospace storms? J. Geophys. Res. 2017, vol. 122, iss. 11, pp. 11543–11547.

Burov V.A., Meleshkov Yu.S., Ochelkov Yu.P. The technique of operational evolution of the level of radiation danger due to the cosmic weather disturbance during air travel. Geliogeofizicheskie issledovaniya [Heliogeophysical Res.]. 2014, iss. 7, pp. 61–81. (In Russian).

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.

Crooker N.U. Solar and heliospheric geoeffective disturbances. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2000, vol. 62, pp. 1071–1085.

Daglis I.A., Thorne R.M., Baumjohann W., Orisini S. The terrestrial ring current: Origin, formation, evolution, and decay. Rev. Geophys. 1999, vol. 37, pp. 407–438.

Danilova O.A., Demina I.A., Ptitsyna N.G., Tyasto M.I. Mapping of geomagnetic cutoff rigidity of cosmic rays during the main phase of the magnetic storm of November 20, 2003. Geomagnetism and Aeronomy. 2019, vol. 59, no. 2. pp. 147–154. DOI: 10.1134/S0016793219020051.

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

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Variations in geomagnetic cutoff rigidity of cosmic rays in some regions of Asia during the 2003 extreme events. Solnechno-zemnaya fizika [Solar-Terrestrial Physics]. 2009, iss. 14, pp. 23–26. (In Russian).

Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Diagnostics of the electromagnetic characteristics of the interplanetary medium based on cosmic ray effects. Geomagnetism and Aeronomy. 2013, vol. 53, iss. 4, pp. 430–440.

Dubyagin S., Ganushkina N., Kubysheva M., Liemohn M. Contribution from different current systems to SYM and ASY midlatitude indices. J. Geophys. Res. 2014, vol. 119, pp. 7243–7263. DOI: 10.1002/2014JA020122

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.

Feldstein Y.I., Starkov G.V. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances. Planetary and Space Sci. 1967, vol. 15, iss. 2, pp. 209–229. DOI: 10.1016/0032-0633(67)90190.

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 International Cosmic Ray Conference. Moscow. 1987, vol. 4, pp. 216.

Gosling J.T., Baker D.N., Bame S.J., Feldman W.C., Zwickl R.D., Smith E. J. North-south and dawn-dusk plasma asymmetries in the distant tail lobes: ISEE 3. J. Geophys. Res.: Space Phys. 1985, vol. 90, iss. A7, pp. 6354–6360. DOI: 10.1029/JA090iA07p06354.

Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V., Eroshenko E.A., Ptitsyna N.G., Villaresi G., 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).

Kress B.T., Hudson M.K., Selesnick R.S., Mertens C.J., Engel M. Modeling geomagnetic cutoffs for space weather applications. *J. Geophys. Res.* 2015, vol. 120, no. 7, pp. 5694–5702. DOI: [10.1002/2014JA020899](https://doi.org/10.1002/2014JA020899).

Kryakunova O.N., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Variations of the cosmic ray cutoff rigidity in Irkutsk and Almaty during the extreme events in 2003. *Proc. 31st International Cosmic Ray Conference*. July 2009. Lod'z., pp. 3414–3418.

Kudela K., Bucik R. Low energy cosmic rays and the disturbed magnetosphere. *Proc. 2nd International Symposium SEE-2005*. Nor-Amberd, Armenia. 2005, pp. 57–62. <https://arxiv.org/pdf/1303.4052.pdf>.

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).

Liemohn M.W., Kozyra J.U., Thomsen M.F., Roeder J.L., Lu G., Borovsky J.E., Cayton T.E. Dominant role of the asymmetric ring current in producing stormtime *Dst**. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, A6, pp. 10,883–10,904. DOI: [10.1029/2000JA000326](https://doi.org/10.1029/2000JA000326).

Newel P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A01206. DOI: [10.1029/2006JA012015](https://doi.org/10.1029/2006JA012015).

Ohtani S., Nose M., Rostoker G., Singer H., Lui A.T.Y., Nakamura M. Storm-substorm relationship: Contribution of the tail current to *Dst*. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, A10, pp. 21199–21209. DOI: [10.1029/2000JA000400](https://doi.org/10.1029/2000JA000400).

Park K.S., Ogino T., Walke R.J. On the importance of antiparallel reconnection when the dipole tilt and IMF B_z are nonzero. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A05202. DOI: [10.1029/2004JA010972](https://doi.org/10.1029/2004JA010972).

Potemra T.A. Birkeland currents in the Earth's magnetosphere. *Astrophys. Space Sci.* 1988, vol. 144, no. 1-2, pp. 155–169.

Ptitsyna N. G., Danilova O. A., Tyasto M. I., Sdobnov V.E. Influence of the Solar Wind and Geomagnetic Activity Parameters on Variations in the Cosmic Ray Cutoff Rigidity during Strong Magnetic Storms. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019, vol. 59, no. 5. pp. 569–577. DOI: [10.1134/S0016793219050098](https://doi.org/10.1134/S0016793219050098).

Rawat R., Alex S., Lakhina G.S. Geomagnetic storm characteristics under varied interplanetary conditions. *Bull. Astron. Soc. India*. 2007, vol. 35, pp. 499–509.

Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.P. Acceleration and loss of relativistic electrons during geo-magnetic storms. *Geophys. Res. Lett.* 2003, vol. 30, no. 10, pp. 1529–1544. DOI: [10.1029/2002GL016513](https://doi.org/10.1029/2002GL016513).

Russell C.T. The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: A tutorial. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2000, vol. 28, no. 6, pp. 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, pp. 4117–4130.

Siscoe G.L., McPherron R.L., Jordanova V.K. Diminished contribution of ram pressure to *Dst* during magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, pp. A12227. DOI: [10.1029/2005JA011120](https://doi.org/10.1029/2005JA011120).

Thomsen M.F. Why K_p is such a good measure of magnetospheric convection. *Space Weather*. 2004, vol. 2, S11044. DOI: [10.1029/2004SW000089](https://doi.org/10.1029/2004SW000089).

Tsurutani B.T., Echer E., Guarnieri F.L., Kozyra J.U. CAUSES November 7–8, 2004, superstorm: Complex solar and interplanetary features in the post-solar maximum phase. *Geophys. Res. Lett.* 2008, vol. 35, no. 6, pp. 1–6. DOI: [10.1029/2007GL031473](https://doi.org/10.1029/2007GL031473).

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, A5, pp. 1209–1224.

Turner N.E., Baker D.N., Pulkkinen T.I., McPherron R.L. Evaluation of the tail current contribution to *Dst*. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, iss. A3, pp. 5431–5439. DOI: [10.1029/1999JA000248](https://doi.org/10.1029/1999JA000248).

Tyasto M.I., Danilova O.A., Ptitsyna N.G., Sdobnov V.E. Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the great geomagnetic storm of November 2004. *Adv. Space Res.* 2013, vol. 51, iss. 7, pp. 1230–1237.

Yermolaev Yu.I., Zeleny L.M., Zastenker G.N., Petrukovich A.A., Yermolaev M.Yu., Nikolaeva N.S., et al. A year later: Solar, heliospheric and magnetospheric disturbances in November 2004. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2005, vol. 45, iss. 6, pp. 681–719. (In Russian).

Как цитировать эту статью

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