

УДК 523-62,59

ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ВО ВЗАИМОСВЯЗИ ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ БУРИ 15 МАЯ 2005 г.

© 2023 г. О. А. Данилова¹, *, Н. Г. Птицына¹, **, М. И. Тясто¹, ***

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН), Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: md1555@mail.ru

**e-mail: nataliaptitsyna@ya.ru

***e-mail: mtyasto@mail.ru

Поступила в редакцию 06.02.2023 г.

После доработки 13.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

Вариации жесткостей обрезания космических лучей (ΔR) в зависимости от параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля (ММП) и геомагнитной активности исследованы на разных фазах сильной магнитной бури 15 мая 2005 г. Найдено, что траектории ΔR , т.е. последовательные значения, которые принимает ΔR в зависимости от исследуемых параметров, во время главной фазы бури не совпадали с траекториями на восстановительной фазе, что обусловило формирование петель гистерезиса. Наиболее четкие петли гистерезиса сформированы для связи ΔR с B_z -компонентой ММП, плотностью и давлением солнечного ветра, а также Dst -индексом геомагнитной активности. Площадь петель гистерезиса увеличивается с ростом широты станции наблюдения космических лучей.

Ключевые слова: жесткость обрезания, космические лучи, солнечный ветер, магнитосфера, магнитная буря, геомагнитная активность.

DOI: 10.31857/S001679402360014X, **EDN:** OJXWJT

1. ВВЕДЕНИЕ

Жесткость геомагнитного обрезания или геомагнитный порог R космических лучей (КЛ) — это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из-за магнитного экранирования Земли. Магнитное поле Земли, которое влияет на транспорт КЛ, обусловлено как внутренними, так и внешними источниками. Постоянное магнитное поле Земли с 1900 г. уменьшилось на ~6%, при этом скорость изменения была различна в разных регионах Земли. В работах [Гвоздевский и др., 2016; 2018] оценивалось влияние такой перестройки магнитного поля на планетарное распределение жесткостей обрезания с 1950 г., когда начались регулярные наблюдения КЛ, до настоящего времени. Было получено, что жесткости обрезания за это время уменьшились в среднем на 0.2 ГВ (–0.0028 ГВ в год). Свойства геомагнитного экрана также изменяются под воздействием внешних источников, в результате динамического взаимодействия магнитных и электрических полей солнечного ветра (СВ) с магнитосферными полями и токами. В ряде работ показано, что во время различных геомагнитных возмущений существенно меняют-

ся жесткости геомагнитного обрезания [Янчуковский и Филимонов, 2000; Leske et al., 2001; Belov et al., 2005; Kudela et al., 2008; Кравцова и Сдобнов, 2013; Янчуковский, 2017; Птицына и др., 2019; Кравцова и др., 2020]. Особенно значительные изменения в жесткостях обрезания (ΔR) происходят во время геомагнитной бури, когда в магнитосфере формируются интенсивные глобальные токовые системы: кольцевой ток, токи на магнитопаузе и в хвосте магнитосферы, а также продольные токи, что приводит к ослаблению геомагнитного экрана. Типичным ответом на магнитную бурю является значительное уменьшение жесткости геомагнитного обрезания (до $\Delta R \sim -1$ ГВ) во время главной фазы магнитной бури [Тясто и др., 2004; Белов и др., 2005; Kress et al., 2010, 2015; Adriani et al., 2016; Кичигин и др., 2017; Птицына и др., 2019]. Как правило, падение жесткостей во время главной фазы обусловлено развитием кольцевого тока. Также отмечены изменения жесткости геомагнитного обрезания в начале бури, при развитии токов на магнитопаузе. При этом может наблюдаться как увеличение, так и уменьшение жесткостей обрезания [Flueckiger et al., 1987; Belov et al., 2005; Kress et al., 2010].

Стандартным методом для получения жесткостей обрезания в магнитном поле Земли является численное интегрирование уравнения движения заряженных частиц в геомагнитном поле с учетом внутренних и внешних источников магнитного поля. Этот метод был разработан в 1960-х годах [McCracken et al., 1962; Shea et al., 1965], и с тех пор на его основе широко проводятся многочисленные исследования магнитосферных эффектов КЛ [например, Kress et al., 2010, 2015; Белов и др., 2021 и ссылки там]. Другим способом, который позволяет получить жесткости геомагнитного обрезания, является метод спектрографической глобальной съемки. Этот метод определяет жесткости геомагнитного обрезания на базе данных, полученных на мировой сети станций КЛ [Дворников и Сдобнов, 1991]. Сравнение результатов, полученных этими двумя методами, демонстрирует, в целом, их хорошее согласие, хотя найденная картина может отличаться в деталях [например, Belov et al., 2005; Птицына и др. 2019]. Интенсификация и распад токовых систем, которые контролируются поступлением в магнитосферу энергии СВ, происходят в различных режимах во время трех этапов развития геомагнитной бури (начальная, главная и восстановительная фазы). Поэтому зависимость ΔR от параметров СВ и межпланетного магнитного поля (ММП) также может отличаться на разных фазах бури [Adriani et al., 2016; Птицына и др. 2020]. Недавно мы обнаружили новое явление во время эволюции двух супербурь, осенью 2003 и 2004 г. [Птицына и др. 2021а, б]. Найдено, что траектория ΔR , т.е. последовательные значения, которые принимает ΔR в зависимости от параметров СВ, межпланетного магнитного поля и геомагнитных индексов во время главной фазы не совпадает с траекторией в восстановительной фазе, что является признаком гистерезиса. Наличие эффектов гистерезиса для других сильных магнитных бурь, оставалось под вопросом. Для исследования мы выбрали наиболее интенсивную бурю в 2005 г., произошедшую 15 мая 2005 г. Солнечные, межпланетные и геофизические условия для этой бури исследовались в ряде работ [см. Bisi et al., 2010, и ссылки там].

Цель данной работы: исследовать наличие эффектов гистерезиса во время геомагнитной бури 15 мая 2005 г., их характерных черт, а также зависимость этих эффектов от широты.

2. МЕТОД И ДАННЫЕ

Вертикальные эффективные геомагнитные пороги $R_{\text{эф}}$ были получены численным методом прослеживания траекторий частиц КЛ в геомагнитном поле [McCracken et al., 1962; Shea et al., 1965]. Для расчета геомагнитных порогов необходимо задать магнитное поле, которое обычно описывается какой-либо моделью [Shea et al.,

1965]. В данной работе была использована модель $Ts01$, которая построена по базе данных измерений магнитного поля на спутниках в период 37 геомагнитных бурь с $Dst \leq -65$ нТл [Tsyganenko et al., 2002a, b]. Для описания сильных бурь была разработана также модель $Ts04$ [Tsyganenko and Sitnov, 2005]. Однако наш анализ, проведенный в [Тясто и др., 2008; Tyasto et al., 2013], показал, что модель $Ts01$ лучше, чем $Ts04$ описывает магнитосферные эффекты во время больших бурь.

Все результаты расчетов $R_{\text{эф}}$ получены на определенный момент времени (почасовые значения) и учитывают характерные особенности магнитосферы и внутреннего магнитного поля Земли в данный момент времени. Для того чтобы рассчитать магнитное поле от внутренних источников, в модели $Ts01$ используется представление главного магнитного поля Земли в виде разложения по сферическим гармоническим функциям; значения на момент бури приводятся при помощи векового хода.

Жесткости обрезания “в спокойное время”, получены как среднее арифметическое почасовых значений за эти сутки. Значения $R_{\text{эф}}$ были определены для следующих станций: Токио (35.75° N, 139.72° E), Алма-Аты (43.20° N, 76.94° E), Рим (41.90° N, 12.52° E), Иркутск (52.47° N, 104.03° E), Ньюарк (39.70° N, 75.75° W), Москва (55.47° N, 37.32° E), Хобарт (42.90° S, 147.33° E). Станции выбирались таким образом, чтобы они в спокойное время охватывали основную область пороговых жесткостей R , подверженных влиянию геомагнитного поля: Токио — 11.01 ГВ, Алматы — 6.17 ГВ, Рим — 6.08 ГВ, Иркутск — 3.25 ГВ, Ньюарк — 2.27 ГВ, Москва — 2.13 ГВ, Хобарт — 1.8 ГВ. Значения $\Delta R_{\text{эф}}$ определялись как разности между почасовыми значениями $R_{\text{эф}}$ за 15 мая 2005 г. и средними значениями жесткости в течение спокойного дня 10 июня 2004 г.

Данные о параметрах СВ (плотность N , скорость V , давление P), ММП (полное поле B , компоненты B_z и B_y), индексах геомагнитной активности (K_p и Dst) за каждый час 15 мая 2005 г. взяты из базы OMNI (на 2007 г.) взяты на сайте (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

3. ВАРИАЦИИ ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КЛ

На рис. 1а приведены рассчитанные вариации жесткостей обрезания $\Delta R_{\text{эф}}$ рассчитанные для семи исследуемых станций: Токио, Алматы, Рим, Иркутск, Ньюарк, Москва и Хобарт. На рис. 1б–1ж показаны вариации некоторых параметров межпланетной среды и геомагнитного возмущения во время магнитной бури: полное межпланетное магнитное поле B ; B_y - и B_z -компоненты ММП;

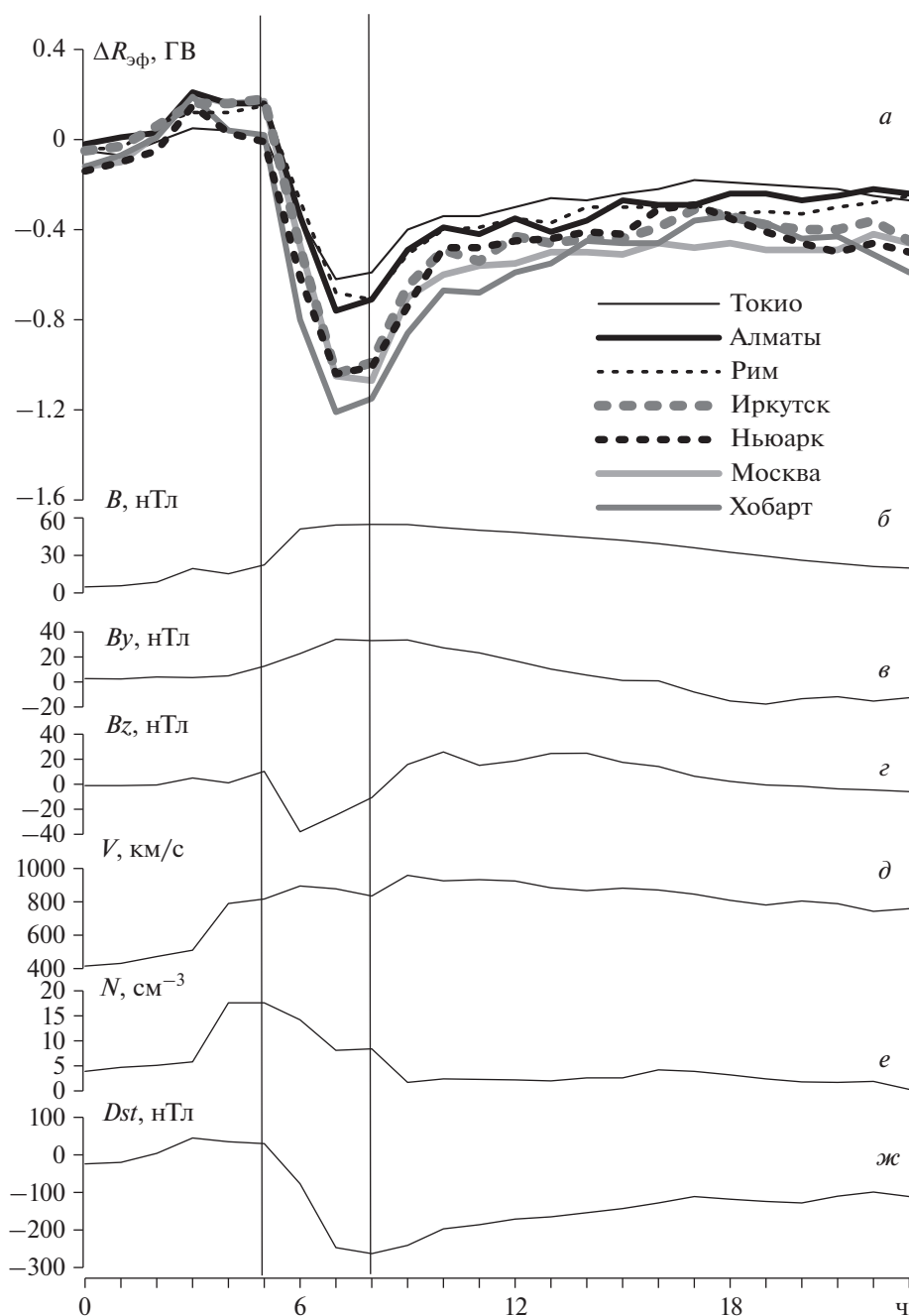


Рис. 1. Вариации жесткостей обреза $\Delta R_{\text{эф}}$ на разноширотных станциях КЛ, а также параметров СВ, межпланетного магнитного поля и геомагнитной активности 15 мая 2005 г. Начало и конец главной фазы отмечены вертикальными линиями.

скорость V и плотность N СВ, а также Dst -индекс геомагнитной активности.

Начало бури отмечено внезапным увеличением N в 03:00 UT, главная фаза началась в ~05:00 UT с момента поворота B_z к Югу и с начала падения Dst -индекса, который достиг минимального значения -263 нТл в 08:00 UT, после чего началась фаза восстановления. Начало и

конец главной фазы отмечены на рис. 1 вертикальными линиями.

Видно, что в общих чертах кривые значений $\Delta R_{\text{эф}}$ следуют за изменениями Dst . Это свидетельствует о том, что в $\Delta R_{\text{эф}}$ основной вклад вносит кольцевой ток. Во время главной фазы происходит уменьшение значений $\Delta R_{\text{эф}}$, которое варьирует от -0.6 ГВ до -1.1 ГВ на разных станциях. Мак-

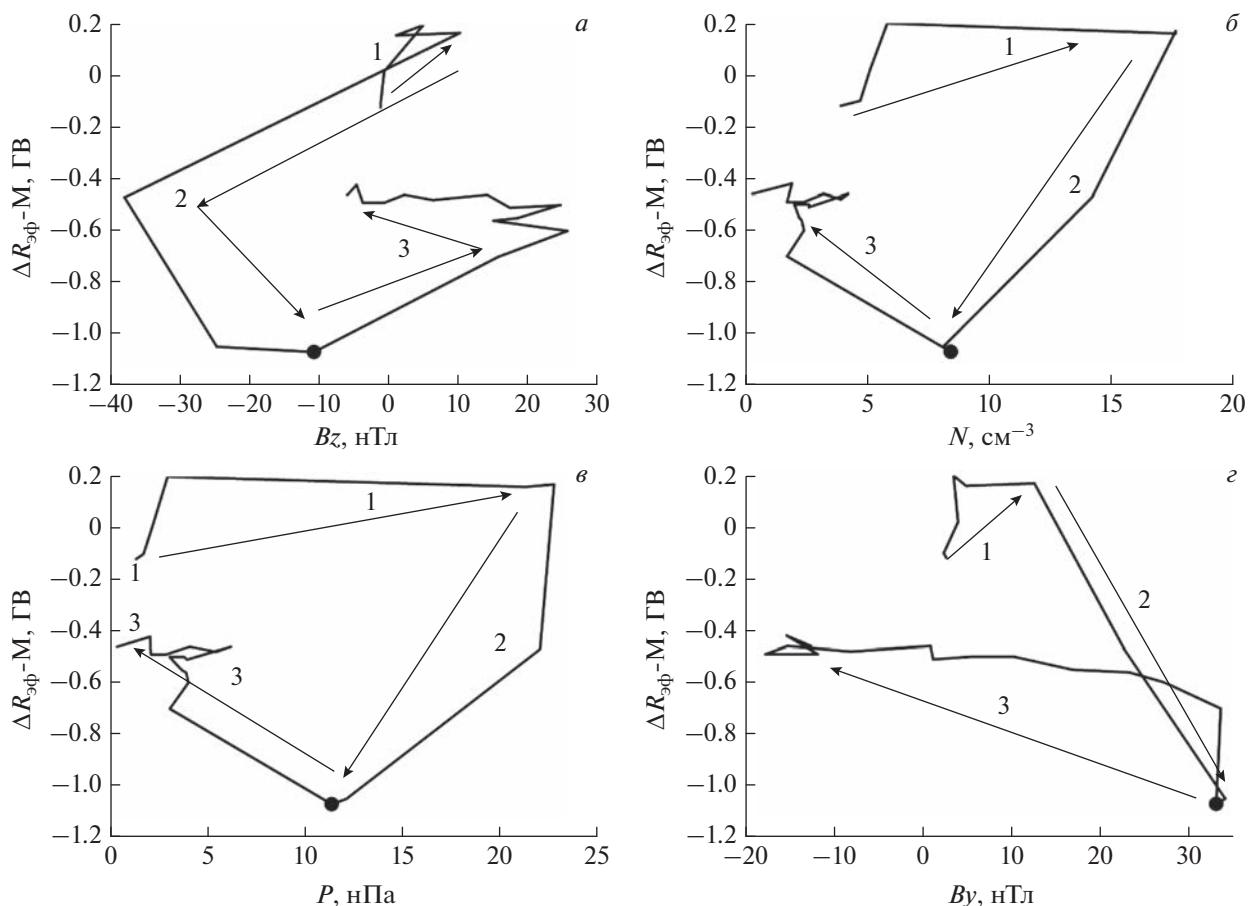


Рис. 2. Взаимосвязь $\Delta R_{\text{эф}}$ на ст. Москва с параметрами геомагнитной активности, ММП и СВ. Три фазы бури: (1) — предварительная, (2) — главная, (3) — восстановительная. Стрелками указано направление течения времени при развитии бури. Черный кружок указывает момент максимума бури, который совпадает с концом главной фазы.

симальное падение отмечено на станции Москва в момент максимума бури. При этом отмечается широтный эффект: значения $\Delta R_{\text{эф}}$ убывают с возрастанием широты станции наблюдения.

4. ЭФФЕКТЫ ГИСТЕРЕЗИСА

Результат анализа взаимосвязи между жесткими обрезания $\Delta R_{\text{эф}}$ и параметрами гелио- и магнитосферы для станции Москва приведен на рис. 2 в виде диаграммы зависимости $\Delta R_{\text{эф}}$ от одного из исследуемых параметров. На рисунке стрелками отмечены зависимости различных пар ΔR –параметр на начальной, главной и восстановительной фазах бури. Направление времени протекания процессов указано стрелками, черными кружками отмечен минимум Dst . Видно, что кривая зависимости значений $\Delta R_{\text{эф}}$ от одного из аргументов (B , B_z , V_y , N , P , V , Dst , и Kp) характеризуется двумя ветвями: нисходящая ветвь (начальная и главная фазы бури) и восходящая (восстановительная). На нисходящей ветви геомагнитный порог уменьшается, на восходящей

увеличивается. Рис. 2а демонстрирует неоднозначность связи переменных $\Delta R_{\text{эф}}$ и B_z . Траектория ΔR , т.е. последовательные значения, которые принимает ΔR в зависимости от параметров B_z во время главной фазы (2) существенно образом не совпадает с траекторией на восстановительной фазе (3), формируется широкая петля гистерезиса. Такого же типа широкие петли гистерезиса характерны и для связи с N и P . Траектории на диаграммах ΔR – V_y (см. рис. 2г), ΔR – B (см. рис. 2д) и ΔR – V (см. рис. 2е) носят более запутанный характер. Можно видеть, что траектории восходящей и нисходящей ветви пересекают друг друга и они сильно разомкнуты, т.е. наблюдается лишь подобие гистерезиса. Диаграммы связи ΔR с геомагнитными индексами Dst и Kp формируют узкую петлю гистерезиса.

Конфигурация петли определяется степенью симметрии/асимметрии процесса, вызывающего гистерезис [Серенсен и др., 1975; Атабеков, 2009]. Можно предположить, что разница в форме петель обусловлена различной асимметрией цикли-

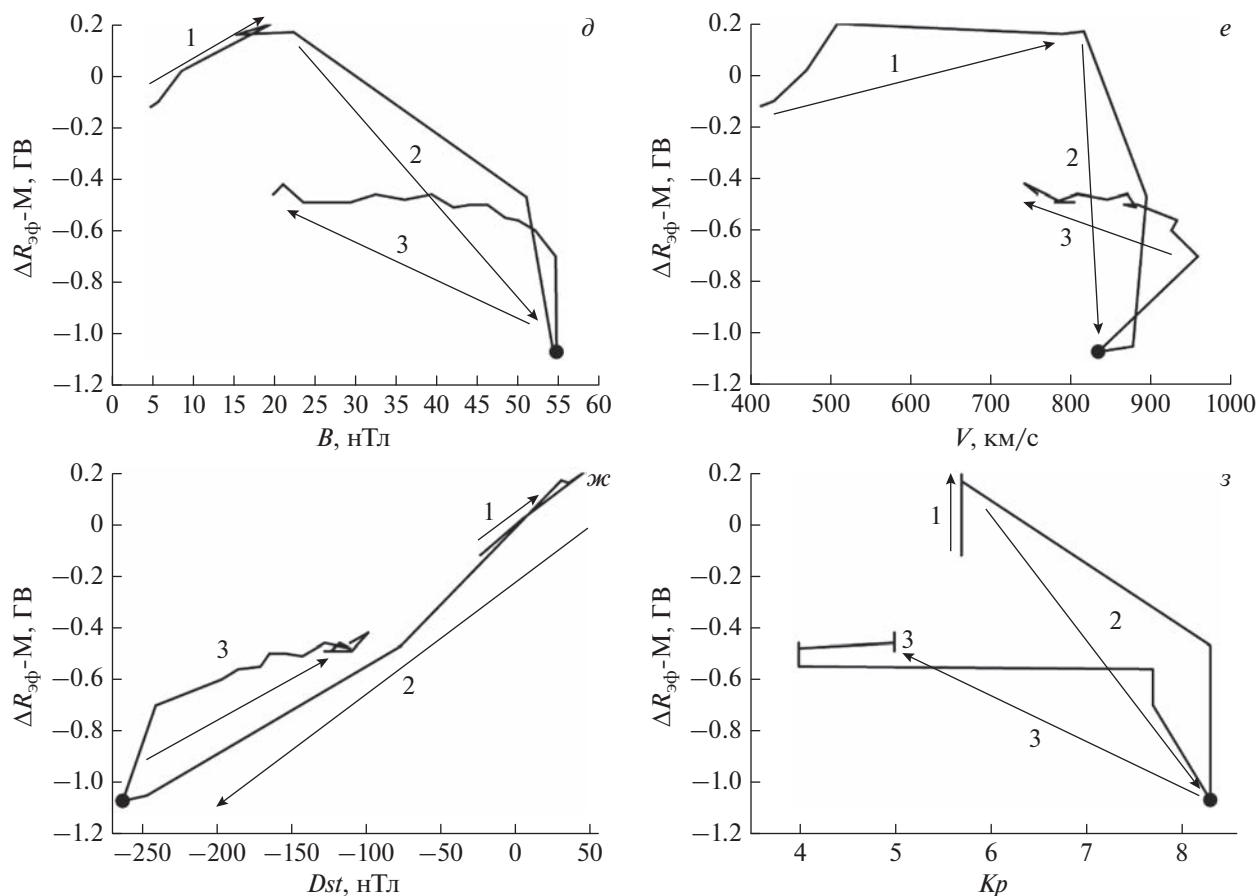


Рис. 2. Окончание.

ческих изменений исследуемых параметров геомагнитосферы в процессе эволюции бури.

На рис. 1а виден широтный эффект в вариациях геомагнитных порогов $\Delta R_{эф}$. Чтобы исследовать, как широтный эффект проявляется в явлениях гистерезиса, мы построили диаграммы связи для всех исследуемых станций КЛ. Для всех станций петли гистерезиса в зависимости от каждого параметра магнитосферы (не показаны здесь) получаются аналогичными тем, которые показаны на рис. 2, т.е. как на станции Москва. Чтобы не перегружать рисунок, на диаграммах приведены петли гистерезиса, наблюдаемые на четырех станциях: Токио, Алматы, Москва и Хобарт. Для иллюстрации на рис. 3а–3в приведены диаграммы связи $\Delta R_{эф}$ с параметрами Dst , B_z , и N , которые формируют наиболее четкие петли гистерезиса.

На рисунках 3а–3в видно, что нижняя точка петли гистерезиса смещается вниз по оси ординат с переходом от низкоширотных станций, для которых в спокойное время наблюдаются высокие жесткости обреза R (Токио, Алматы) к станциям с низкими жесткостями обреза (Москва, Хобарт). Петли гистерезиса для станций Рим, Ир-

кутск и Ньюарк располагаются между петлями для станций Токио и Хобарт. Видно, что площадь петель гистерезиса $\Delta R_{эф}$ (Dst , B_z и N) увеличивается с ростом R (снижением широты). Для остальных параметров СВ и магнитосферы (не показаны здесь) наблюдается аналогичная зависимость $\Delta R_{эф}$ от R (т.е. от широты).

Следует отметить, что площадь петли гистерезиса пропорциональна количеству энергии, которая теряется (переходит в тепло через диссипативные процессы) в ходе цикла гистерезиса [Красносельский и Покровский, 1983]. Таким образом, тот факт, что петля гистерезиса растягивается при переходе к более высоким широтам, т.е. ее площадь становится больше, свидетельствует, о том, что в данном случае могут действовать дополнительные диссипативные процессы, связанные с высокоширотными токовыми системами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С началом главной фазы магнитной бури 15 мая 2005 г. наблюдалось уменьшение геомагнитных порогов на всех семи выбранных для анализа станциях КЛ. На ст. Москва падение достигло

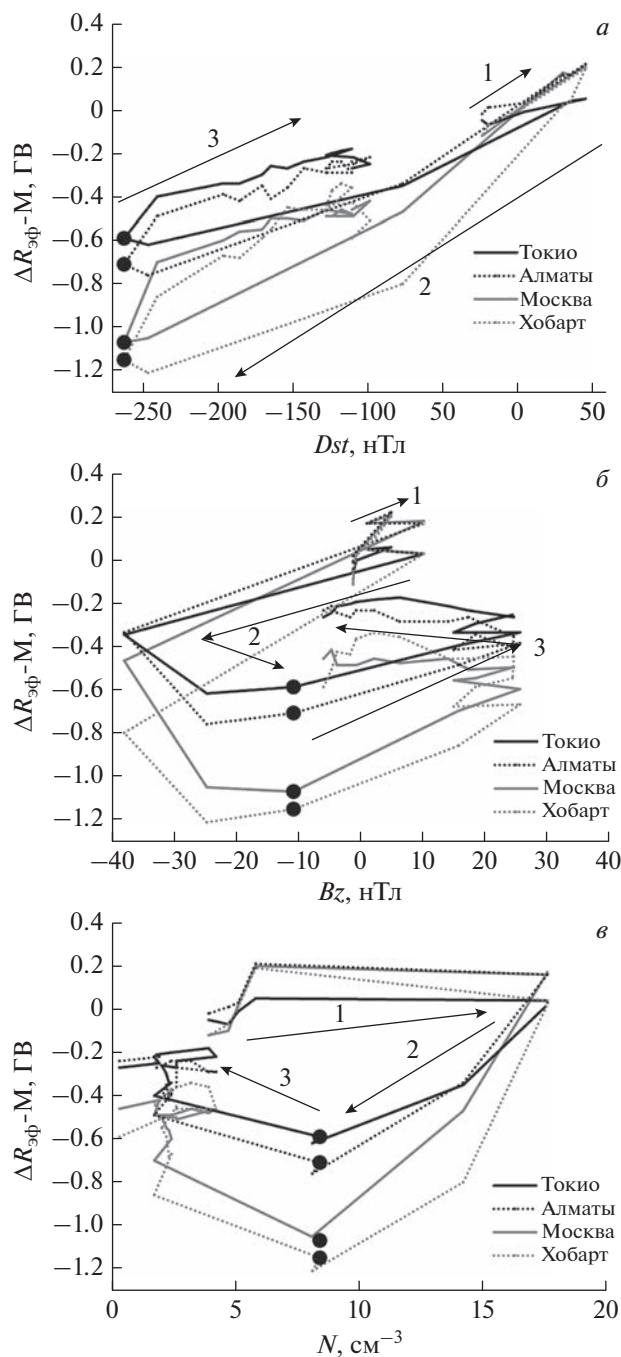


Рис. 3. Петли гистерезиса для зависимости $\Delta R_{эф}$ от Dst , Bz , N , для разноширотных станций. Фазы бури: (1) – предварительная, (2) – главная, (3) – восстановительная. Черным кружком отмечен максимум бури.

максимума в минимуме Dst -индекса и составило -1.1 ГВ. После этого с наступлением восстановительной фазы началось увеличение порогов. Однако уменьшение и последующее увеличение порогов в зависимости от изменения параметров СВ и магнитосферы происходило по разным траекториям, которые в результате сформировали пет-

ли гистерезиса. Наиболее четкие петли гистерезиса образованы зависимостями $\Delta R_{эф}$ от Bz , N и Dst . С уменьшением жесткости обрезания станции в спокойное время (увеличением широты) площадь петли гистерезиса увеличивается.

Площадь полученного в нашей работе гистерезиса, вероятно, определяет ту часть энергии СВ, поступающей в магнитосферу, которая теряется во время эволюции магнитной бури. Механизм гистерезиса геомагнитных порогов во время магнитной бури неизвестен. Вероятно, полученный гистерезис обусловлен асимметрией циклических изменений в конфигурации геомагнитосферы в процессе эволюции бури – резкое искажение ее в главной фазе и последующее восстановление. Накопление энергии на главной фазе бури при развитии кольцевого тока, который является основным драйвером бури, и ее последующее высвобождение на восстановительной фазе происходило не симметрично. Другие токовые системы, которые развиваются и затухают на разных временных масштабах, также могли вносить асимметричный вклад в процесс развития бури.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят создателей OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) за возможность воспользоваться данными, а также двух анонимных рецензентов за полезные замечания.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. СПб.: Лань, 592 с. 2009.
- Белов С.М., Зобнин Г.И., Янке В.Г. Калькулятор жесткостей геомагнитного обрезания космических лучей и траекторий их движения // Изв. РАН. Сер. Физич. Т. 85. № 11. С. 1637–1641. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0367676521110065>
- Гвоздецкий Б.Б., Белов А.В., Гущина Р.Т., Ерошенко Е.А., Данилова О.А., Янке В.Г. Особенности долговременных изменений жесткостей геомагнитного обрезания космических лучей наклонных направлений // Proc. XLI Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”. Apatity. С. 80–83. Polar Geophysical Institute. 2018. <https://doi.org/10.25702/KSC.2588–0039.2018.41.80–83>
- Гвоздецкий Б.Б., Абуни А.А., Кобелев П.Г., Гущина Р.Т., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г. Магнитосферные эффекты космических лучей. I. Долговременные изменения жесткостей геомагнитного обрезания для станций мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 56. № 4. С. 411–422. 2016.
- Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Модификация метода спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций планетарной системы жесткостей геомаг-

- нитного обрезания // Изв. АН СССР. Сер. Физ. Т. 55. № 10. С. 1988–1991. 1991.
- Кичигин Г.Н., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Параметры токовых систем в магнитосфере по данным наблюдений космических лучей в период магнитной бури в июне 2015 г. // Солнечно-земная физика. Т. 3. № 3. С. 15–19. 2017.
<https://doi.org/10.12737/szf-33201702>
- Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Спорадические события в космических лучах в первой половине 2012 г. // Солнечно-земная физика. Вып. 23. С. 58–63. 2013.
- Кравцова М.В., Олемской С.В., Сдобнов В.Е. Космические лучи в период Форбуш - эффектов в марте 1989 г. и в марте 1991 г.: спектры вариаций, анизотропия и вариации жесткости геомагнитного обрезания // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 4. С. 448–456. 2020.
<https://doi.org/10.31857/S0016794020040082>
- Красносельский М.А., Покровский А.В. Системы с гистерезисом. М.: Наука, 271 с. 1983.
- 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 аэрономия. Т. 59. № 5. С. 569–577. 2019.
<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 аэрономия. Т. 60. № 3. С. 281–292. 2020.
<https://doi.org/10.31857/S0016794020020145>
- Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И. Явления гистерезиса в жесткости обрезания космических лучей во время супербури 7–8 ноября 2004 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 4. С. 418–427. 2021a.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021040131>
- Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Динамика жесткости обрезания космических лучей и параметров магнитосферы во время различных фаз бури 20 ноября 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 2. С. 160–171. 2021b.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021010120>
- Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность деталей машин. М.: Машиностроение. 354 с. 1975.
- Тясто М.И., Данилова О.А., Вернова Е.С., Птицына Н.Г., Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Ючки Н., Паризи М., Виллорези Дж. Жесткости обрезания космических лучей в период магнитных бурь: сравнение магнитосферных моделей // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 3. С. 296–302. 2004.
- Тясто М.И., Данилова О.А., Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Отражение параметров солнечного ветра в жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в период сильной магнитной бури в ноябре 2003 // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 6. С. 723–740. 2008.
- Янчуковский В. Л., Филимонов Г. Я. Результаты многоканальной регистрации космических лучей нейтронным монитором // Изв. РАН. Сер. Физич. Т. 63 №2 С. 409–412. 2000.
- Янчуковский В.Л. Параметры магнитосферы по данным наземного мониторинга космических лучей // Интерэкспо геосибирь. Т. 4. № 1. С. 210–214. 2017.
- Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.N., Bellotti R. et al. PAMELA's measurements of geomagnetic cutoff variations during the 14 December 2006 // Space Weather. V. 14. № 3. 2016.
<https://doi.org/10.1002/2016SW001364>
- 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. V. 110. A09S20. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011067>
- Bisi M.M., Breen A.R., Jackson B.V. et al. From the Sun to the Earth: The 13 May 2005 coronal mass ejection // Sol. Phys. V. 265. № 1. P. 49–127. 2010.
<https://doi.org/10.1007/s11207-010-9602-8>
- 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. of the 20th Int. Conf. Cosmic Rays. 2–15 Aug 1987. Moscow. USSR. V. 4. P. 216. 1987.
- Kress B.T., Mertens C.J., Wiltberger M. Solar energetic particle cutoff variations during the 29–31 October 2003 geomagnetic storm // Space Weather. V. 8. S05001. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009SW000488>
- Kress B.T., Hudson M.K., Selesnick R.S., Mertens C.J., Engel M. Modeling geomagnetic cutoffs for space weather applications // JGR Space physics V. 120. № 7. P. 5694–5702. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020899>
- Kudela K., Bucik R., Bobik P. On transmissivity of low energy cosmic rays in the disturbed magnetosphere // J. Adv. Space Res. V. 42. № 7. P. 1300–1306. 2008.
- 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. V. 106. P. 30011–30022. 2001.
<https://doi.org/10.1029/2000JA000212>
- McCracken K.G., Rao U.R., Shea M.A. The trajectories of cosmic rays in a high degree simulation of the geomagnetic field // M.I.T. Tech. Rep. 77. Lab. Nucl. Sci. and Eng., Mass. Inst. of Technol. Cambridge. 146 p. 1962.
- 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. V. 70. P. 4117–4130. 1965.
- Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // J. Geophys. Res. V. 107. A8. P. 1176. 2002a.
<https://doi.org/10.1029/2001JA000219>
- Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parametrization and fitting to observation. // J. Geophys. Res. V. 107. A8. P. 1179. 2002b.
<https://doi.org/10.1029/2001JA000220>
- Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 110. A03208. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010798>
- Tyasto M.I., Danilova O.A., Ptiitsyna N.G., Sdobnov V.E. Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the great geomagnetic storm of November 2004 // Adv. Space Res. V. 51. № 7. P. 1230–1237. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.025>