

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

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

Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

**HYSTERESIS PHENOMENA IN THE RELATIONSHIP BETWEEN
THE COSMIC RAY CUTOFF RIGIDITY AND THE PARAMETERS OF
THE MAGNETOSPHERE DURING A STORM ON MAY 15, 2005**

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

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

The study of the recently discovered phenomenon — hysteresis of the cutoff rigidities of cosmic rays during the evolution of superstorms — has been continued. For different phases of the magnetic storm on May 15, 2005, the correlation of cutoff variations with the indices of geomagnetic activity, the parameters of the solar wind and the interplanetary magnetic field (IMF) was investigated. It was found that the trajectories of variations in the cutoff rigidities versus the IMF B_z -component, solar wind density N and geomagnetic activity index Dst during storm intensification (main phase) did not coincide with the trajectories during the recovery phase, which is a sign of hysteresis. With increasing latitude, the area of hysteresis loops increases.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-81-84

1. Введение

Жесткость геомагнитного обрезания или геомагнитный порог R космических лучей (КЛ) – это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из-за магнитного экранирования Земли. Во время магнитных бурь это экранирование уменьшается, и частицы могут проникнуть в более низкие широты, наблюдаются вариации жесткости обрезания (ΔR). Недавно мы обнаружили новое явление во время эволюции супербурь осенью 2003 и 2004 г. [1, 2]. Найдено, что траектория ΔR , т.е. последовательные значения, которые принимает ΔR в зависимости от параметров солнечного ветра (СВ) и магнитосферы, во время главной фазы не совпадает с траекторией в восстановительной фазе – формируются петли гистерезиса. Наличие эффектов гистерезиса для других магнитных бурь, в частности, не таких сильных, оставалась под вопросом.

Цель данной работы: исследовать наличие эффектов гистерезиса во время геомагнитной бури 15 мая 2005 г., а также зависимостей этих эффектов от широты. Для этого мы провели анализ изменения геомагнитных

порогов на разных фазах бури в зависимости от изменений параметров межпланетной среды и геомагнитосферы для разноширотных станций.

2. Метод

Вертикальные эффективные геомагнитные пороги $R_{эф}$ были получены методом траекторий в магнитном поле возмущенной магнитосферы Цыганенко $Ts01$ [3]. $\Delta R_{эф}$ определялись как разности между $R_{эф}$ 15 мая 2005 г. и жесткостями в спокойный добуриевой период. $\Delta R_{эф}$ рассчитаны для следующих станций: Токио ($35^{\circ}.75$ N, $139^{\circ}.72$ E), Алматы ($43^{\circ}.20$ N, $76^{\circ}.94$ E), Москва ($55^{\circ}.47$ N, $37^{\circ}.32$ E), Хобарт ($42^{\circ}.90$ S, $147^{\circ}.33$ E).

3. Вариации жесткостей обрезания во время бури 15 мая 2005 г.

На рисунке 1 приведены полученные вариации жесткостей обрезания $\Delta R_{эф}$, а также поведение некоторых параметров межпланетной среды и геомагнитного возмущения во время магнитной бури.

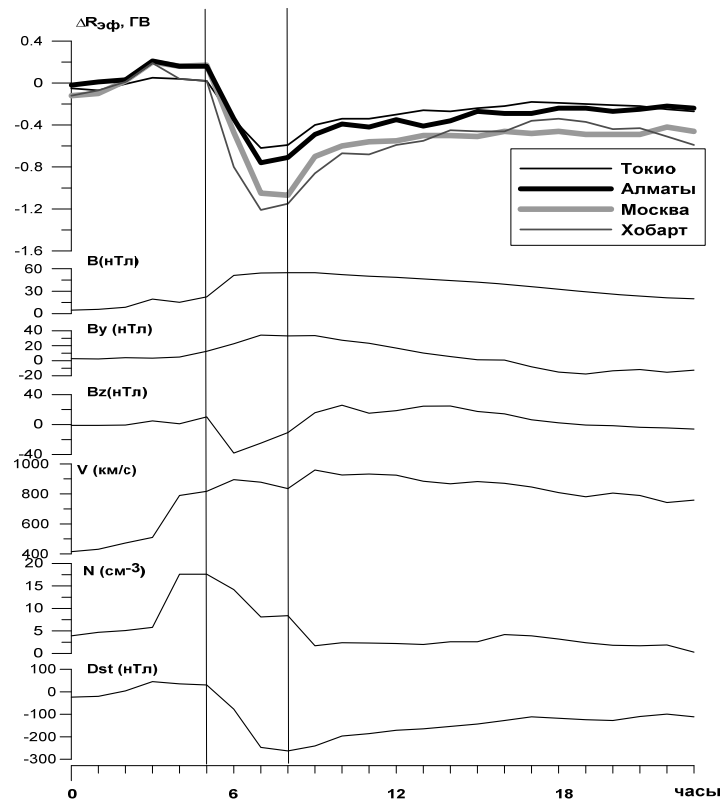


Рис. 1. Вариации жесткостей обрезания $\Delta R_{эф}$, параметры ММП и СВ. Главная фаза отмечена вертикальными линиями.

Видно, что в общих чертах кривые $\Delta R_{эф}$ повторяют изменения Dst , что свидетельствует о том, что в изменения $\Delta R_{эф}$ основной вклад вносит кольцевой ток. Во время главной фазы (минимум $Dst = -263$ нТл) происходит падение $\Delta R_{эф}$, которое варьирует от -0.6 ГВ до -1.1 ГВ на разных станци-

ях. Кроме того, отмечается широтный эффект: $\Delta R_{эф \max}$ убывает с возрастанием широты станции наблюдения.

4. Эффекты гистерезиса

Результат анализа взаимосвязи между жесткостями обрезания и параметрами гелио- и геомагнитосферы для трех станций КЛ приведен на рис. 2 в виде диаграммы зависимости $\Delta R_{эф}$ 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, кружками отмечен минимум Dst .

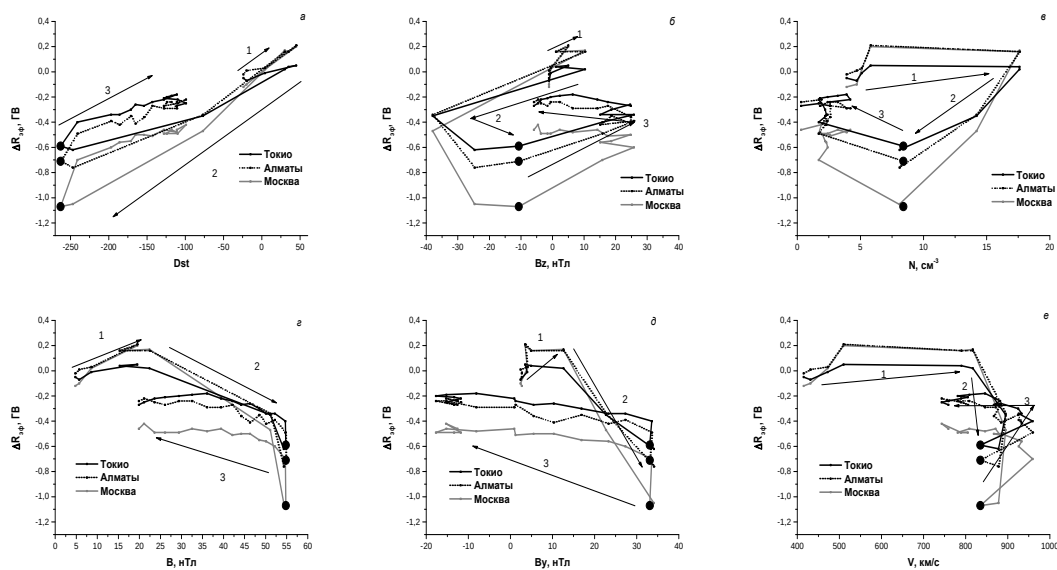


Рис. 2. Петли гистерезиса для зависимости $\Delta R_{эф}$ от Dst , B , Bz , By , N , V для различных фаз бури: 1 – предварительная, 2 – главная, 3 – восстановительная.

Видно, что кривая зависимости $\Delta R_{эф}$ от аргументов (Dst , B , Bz , By , N , V) состоит из двух ветвей: нисходящая ветвь (главная фаза бури) и восходящая (восстановительная). На нисходящей ветви геомагнитный порог уменьшается, на восходящей увеличивается. Так как нисходящая и восходящая ветви не идентичны, в результате образуется петля гистерезиса. Наиболее четкие ветви образуются для зависимостей $\Delta R_{эф}$ (Dst , Bz и N) (рис. 2 верхний ряд). Площадь петель гистерезиса $\Delta R_{эф}$ (Dst , Bz и N) увеличивается с увеличением широты. Зависимости $\Delta R_{эф}$ (B , By , V), показанные в нижнем ряду рис. 2, образуют разомкнутые конфигурации, траектории восходящей и нисходящей ветви пересекают друг друга, т.е. можно наблюдать лишь подобие гистерезиса.

5. Выводы

С началом главной фазы магнитной бури 15 мая 2015 г. началось падение геомагнитных порогов на всех станциях КЛ, которое достигло максимума -1.1 ГВ на ст. Москва в минимуме Dst . 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 петли гистерезиса. Наиболее четкие петли гистерезиса образованы зависимостями $\Delta R_{\text{эф}}$ от Dst , Bz и N . С увеличением широты площадь петли гистерезиса увеличивается. Площадь 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.

Литература

1. 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. 2021.
2. 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. 2021.
3. Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // J. Geophys. Res. V. 107. A8. P. 1179. 2002.