

**СВЯЗЬ ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
С ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И МАГНИТОСФЕРЫ
ВО ВРЕМЯ БУРИ 9–10 НОЯБРЯ 2004 г.:
АНАЛИЗ ЭФФЕКТОВ ГИСТЕРЕЗИСА**

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

Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

**THE RELATIONSHIP OF COSMIC RAY CUTOFF RIGIDITY WITH
SOLAR WIND AND MAGNETOSPHERIC PARAMETERS DURING
THE STORM OF NOVEMBER 9–10, 2004:
ANALYSIS OF HYSTERESIS EFFECTS**

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

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

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-269-272>

We calculated variations in the cosmic ray cutoff rigidity ΔR during a two-stage geomagnetic storm on November 9–10, 2004. We found that the trajectory of ΔR , i.e., the values that take ΔR depending on the parameters under study, during the main phase of each stage of the storm does not coincide with the trajectory in the recovery phases. This is a sign of hysteresis. The features of hysteresis loops for the relationships between ΔR and geomagnetic indices, dynamic and magnetic parameters of the solar wind for the studied geomagnetic disturbance were investigated. In particular, the configuration of two loops similar to those characteristics of dielectric hysteresis was found.

1. Введение

Геомагнитный порог или жесткость R геомагнитного обрезания — это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из-за геомагнитного экранирования, которое увеличивается во время магнитных бурь. Одной из наиболее сильных бурь с начала космической эры считается возмущенный период 7–10 ноября 2004 г., состоящий из двух последовательных бурь 7–8 и 9–10 ноября. В свою очередь, вторая буря состоит из двух понижений Dst , 9 и 10 ноября, т.е. из двух ступеней. В работе [1] найдено, что во время первой бури 7–8 ноября 2004 г. на ее разных фазах наблюдается неодинаковая зависимость ΔR от параметров солнечного ветра СВ и межпланетного магнитного поля ММП. Траектории ΔR в зависимости от исследуемых параметров на фазе интенсификации бури (развитие токовых систем) не совпадали с траекториями на восстановительной фазе (распад токовых систем), что является признаком гистерезиса.

Предметом данного исследования являются особенности зависимостей между ΔR и параметрами гелио- и геомагнитосферы при эволюции второй двуступенчатой бури 9–10 ноября 2004 г.

2. Метод и данные

Рассчитаны эффективные вертикальные геомагнитные пороги R стандартным методом прослеживания траекторий частиц КЛ в магнитном поле магнитосферы, которая описывается моделью $Ts01$ [2]. Вариации ΔR во время бури вычислены для 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).

Параметры СВ (плотность N , скорость V , давление P), ММП (полное поле B , компоненты B_z и B_y , а также азимутальная компонента электрического поля E_y), индексе геомагнитной активности Dst взяты на сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

3. Двуступенчатая буря 9–10 ноября 2004 г. и вариации геомагнитных порогов

На рис. 1а приведены ΔR , на рис. 1б–з — исследуемые параметры. Главная фаза бури началась в 12:00 UT 9 ноября. При этом главная фаза состояла из двух ступеней, из двух падений Dst , которое достигло первого минимума в 21:00 UT 9 ноября ($Dst = -223$ нТл) и затем, после некоторой релаксации произошел следующий более глубокий минимум ($Dst = -289$ нТл) в 11:00 UT 10 ноября. Восстановительная фаза началась в 12:00 UT.

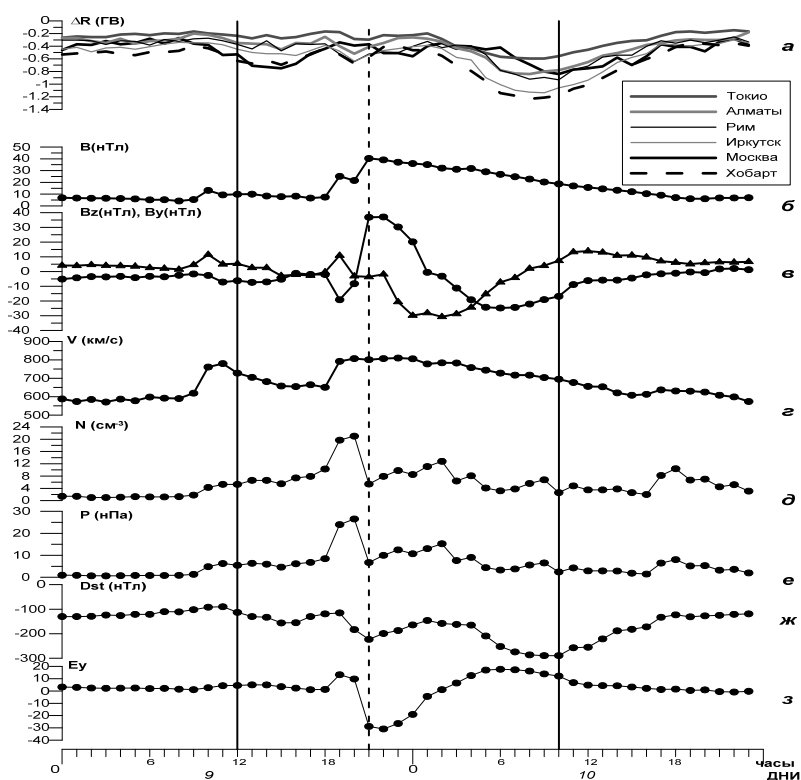


Рис. 1.

На рисунке 1 вертикальными линиями отмечена главная фаза бури 9–10 ноября, штриховой линией — конец главной фазы первой ступеней.

Первое понижение Dst (первая ступень бури) вызвано необычно большим скачком $Bz > 0$ в течение 4 часов. Затем ориентация Bz резко меняется с северной на южную. Длительное $Bz < 0$ обуславливает вторую ступень бури. Видно, что кривые ΔR в целом повторяют поведение Dst , показывая два падения порогов, которые можно соотнести с минимумами Dst , что говорит об основном вкладе кольцевого тока. Максимальные понижения геомагнитных порогов ΔR (0.6–1.24 ГВ) достигаются для разных станций за 1–2 часа до максимума второй ступени геомагнитной бури (минимум Dst).

4. Гистерезис

На рисунке 2а–е приведены диаграммы зависимости ΔR от одного из исследуемых параметров (Dst , B , Bz , B_y , E_y , P) для станции Москва. Открытые кружки соответствуют зависимости различных пар ΔR – параметр на главной и восстановительной фазах первой ступени бури, черные — второй ступени. Цифрами обозначены часы, отсчитываемые от начала бури. Точка 1 соответствует 12:00 UT 9 ноября.

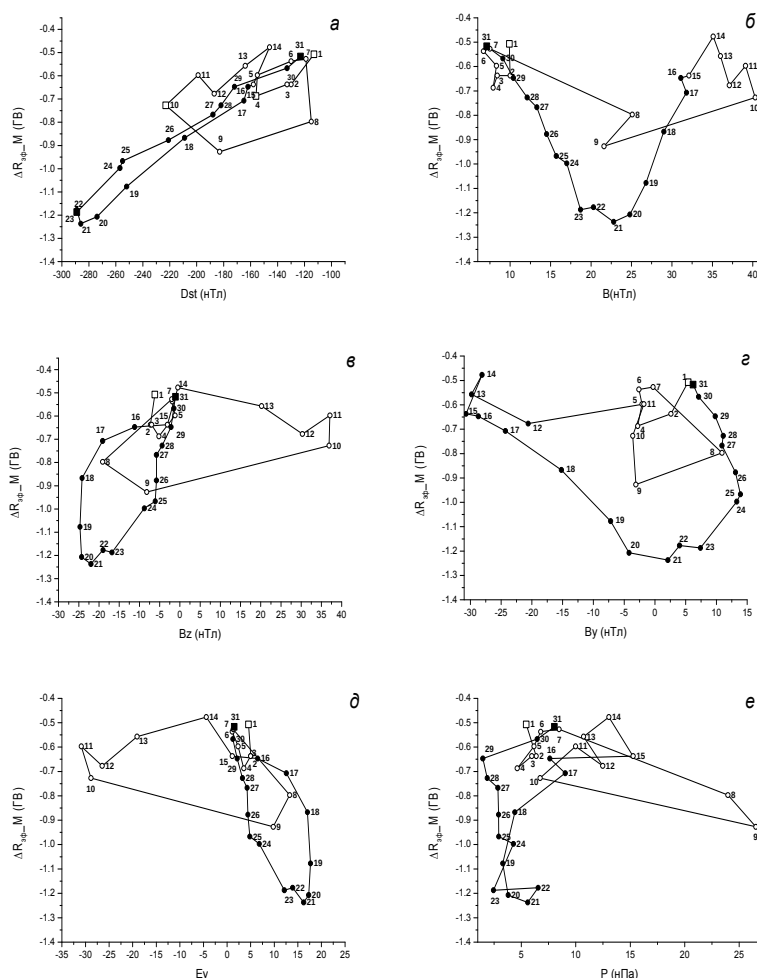


Рис. 2.

На рисунке 2а видно, что траектория ΔR , т.е. последовательные значения, которые принимает ΔR в зависимости от Dst , различны на фазах падения и восстановления для каждой ступени бури (два падения Dst). Такая неоднозначная зависимость является признаком гистерезиса. На главной фазе каждой ступени геомагнитный порог уменьшается, на восстановительной увеличивается — формируется своя петля гистерезиса для каждой ступени бури. Рисунки 2б–д демонстрируют, что кривые зависимости ΔR от электромагнитных параметров B , B_z , B_y и E_y также образуют две петли, по одной петле для каждой ступени.

На рис. 2е приведены петли гистерезиса для зависимости ΔR от P . Видно, что в этом случае кривые носят более запутанный множественный характер, формируя лишь подобие двух петель гистерезиса. Петли для динамических параметров СВ V и N аналогичны.

На панелях рис. 2 можно отметить дополнительную небольшую петлю, связанную с приходом ударной волны, инициировавшей магнитную бурю, что хорошо видно на временных вариациях ΔR на станции Москва (рис. 1а).

5. Выводы

В качестве отклика ΔR на изменение Dst и электромагнитных параметров B_z , B_y и E_y в течение двухступенчатой бури 9–10 ноября 2004 г. сформировалось две петли гистерезиса. Для динамических параметров СВ такой четкой картины не наблюдается. Образование двух и более петель характерно для диэлектрического гистерезиса и связано с тем, что под влиянием внешнего воздействия (электрического поля) происходит фазовый переход с перестройкой структуры сегнетоэлектрика. В нашем случае во время эволюции двух этапов магнитной бури происходит резкая смена ориентации B_z компоненты ММП, с северной на южную, что, по-видимому, можно трактовать как аналог фазового перехода. Неоднозначная зависимость ΔR от исследуемых параметров, которые изменяются циклически при развитии и последующей релаксации магнитосферных токовых систем на каждой ступени бури, ответственна за формирование наблюдаемых петель гистерезиса.

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. 2021. Т. 61. № 4.
2. Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. A8. P. 1179.