**ОСОБЕННОСТИ ГИСТЕРЕЗИСА
В ГЕОМАГНИТНЫХ ПОРОГАХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ВО ВРЕМЯ БУРИ В НАЧАЛЕ СЕНТЯБРЯ 2017 Г.**

Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И.
Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

**FEATURES OF HYSTERESIS
IN THE GEOMAGNETIC THRESHOLDS OF COSMIC RAYS
DURING A STORM IN EARLY SEPTEMBER 2017**

Ptitsyna N.G., Danilova O.A., Tyasto M.I.
St-Petersburg Filial of IZMIRAN, St. Petersburg, Russia

The geomagnetic cutoff rigidity of cosmic rays (R) or geomagnetic threshold, i.e., the lowest rigidity a particle must have in order to penetrate a given point of the magnetosphere, is determined by the geomagnetic field slowing the particle. The properties of the geomagnetic shield change over time, which leads to a change in thresholds (ΔR), especially strong during magnetic storms. We studied the dynamics of changes in ΔR depending on the dynamics of the parameters of the interplanetary medium and magnetosphere at different phases of the storm on September 7–8, 2017. Loop-like hysteresis patterns formed, because the trajectories of variations in the cutoff rigidities versus the interplanetary magnetic field (B and B_z) and geomagnetic activity index Dst during storm intensification did not coincide with the trajectories during the recovery. The hysteresis loops for the relationship between the cutoff rigidities and solar-wind dynamic parameters were not formed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-217-220

Введение

Геомагнитный порог или жесткость геомагнитного обрезания (R) космических лучей (КЛ) – это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из-за магнитного экранирования Земли. Знание вариаций геомагнитных порогов (ΔR) в зависимости от параметров солнечного ветра и магнитосферы во время магнитных возмущений становится все более актуальным для безопасности космических аппаратов и их экипажей, а также для авиaperевозок. Однако результаты исследования зависимости ΔR от межпланетных параметров и геомагнитной активности противоречивы. Это может быть обусловлено тем обстоятельством, что интенсификация и распад токовых систем, которые контролируются поступлением в магнитосферу энергии солнечного ветра (СВ), происходят в различных режимах и на различных масштабах времени. Есть указания на то, что зависимость ΔR от параметров гелио- и геомагнитосферы может быть различной для разных этапов эволюции магнитной бури. Более того, в работах [1, 2] было найдено, что на разных фазах бури наблюдается не только разная зависимость ΔR от варьируемого аргумента – параметров геомагнитной активности, СВ

и межпланетного магнитного поля (ММП), – но и от направления изменения аргумента. Траектории ΔR в зависимости от исследуемых параметров во время интенсификации бури не совпадали с траекториями на восстановительной фазе, что является признаком гистерезиса. Однако явления гистерезиса были обнаружены лишь для двух супербурь (в ноябре 2003 г. и в ноябре 2004 г.) [1, 2]. Поэтому наличие этого эффекта для других магнитных возмущений остается под вопросом.

Целью данного исследования был анализ изменения ΔR в зависимости от изменений параметров межпланетной среды и магнитосферы Земли на разных фазах возмущения 7–8 сентября 2017 г. Результаты такого анализа позволили исследовать возникающие эффекты гистерезиса.

Данные и методы

Вертикальные эффективные геомагнитные пороги $R_{эф}$ были получены методом траекторных расчетов в модельном магнитном поле возмущенной магнитосферы Цыганенко TS01 [3]. Изменения жесткости геомагнитного обрезания $\Delta R_{эф}$ определялись как разности между рассчитанными $R_{эф}$ 7–8 сентября 2017 г. и жесткостями в спокойный добуревой период 6 сентября.

Рис. 1. $R_{эф}$ на ст. Москва и параметры Dst , B , Bz , V .

На рисунке 1 приведено поведение Dst -индекса геомагнитной активности, общего ММП B , южной компоненты ММП Bz и скорости СВ V . Во время исследуемого периода, как видно из рис. 1, Dst -вариация геомагнитного поля имеет минимум (максимум бури) 8.09 в 01:00 UT, когда

$Dst = -142$ нТл. Пик $\Delta R_{эф}$, Bz и B произошел на час раньше, в 0:00 UT. Напротив, скорость V достигла максимума позже – в 8.00 UT 8.09.

Эффекты гистерезиса

Для иллюстрации взаимосвязи между жесткостями обрезания и параметрами гелио- и магнитосферы на рис. 2 приведены диаграммы зависимости $\Delta R_{эф}$ от исследуемых параметров на ст. Москва. Фокус исследования

Рис. 2. Петли гистерезиса для зависимости $\Delta R_{эф}$ от параметров СВ, ММП и геомагнитной активности для фаз бури 7–8 ноября 2017 г.:
(1) – предварительная, (2) – главная, (3) – восстановительная.

был на разнице эффектов, получаемых на различных фазах бури. На рисунке стрелками отмечены зависимости $\Delta R_{эф}$ от Dst , Bz , B и V на начальной, главной и восстановительной фазах. Направление протекания процессов совпадает с направлением стрелки. Видно, что:

1. Фаза 2: $|Dst|$ растет, $|\Delta R_{эф}|$ растет. По мере развития бури (развитие кольцевого тока) с уменьшением Dst до -142 нТл происходит падение $\Delta R_{эф}$. Однако минимальное значение 0.65 ГВ достигается на час раньше, в 0:00 UT 7 сентября (рис. 1а). В этот же момент достигают максимума магнитные параметры B , и Bz , которые ведут себя аналогично Dst (рис. 1б, в).
2. Фаза 3: $|Dst|$ уменьшается, $|\Delta R_{эф}|$ уменьшается. С изменением направления аргумента Dst , т.е. с уменьшением отрицательного значения Dst , наблюдается рост $\Delta R_{эф}$. Аналогичная картина наблюдается для зависимости $\Delta R_{эф}$ от B и Bz .

3. Видно, что направление зависимостей $\Delta R_{\text{эф}}$ от Dst , B и Bz на фазах 2 и 3 (точнее, с момента 0:00UT 7.09) является противоположным. Однако траектория изменения значений $\Delta R_{\text{эф}}$ от Dst , B и Bz на восстановительной фазе не совпадает с траекторией на главной фазе: формируется петлеобразная кривая (рис. 2а, б, в), которая является признаком гистерезиса.
4. Для скорости солнечного ветра – динамического параметра СВ – такой гистерезисной петли не образуется (рис. 2г).

Заключение

Связь жесткости обрезания КЛ с магнитными и геомагнитными параметрами магнитосферы (B , Bz и Dst) зависит от направления их изменения. Траектория изменения $\Delta R_{\text{эф}}$ в зависимости от этих параметров во время развития магнитной бури 7–8 сентября 2017 г. в первом приближении антипараллельна траектории во время ее релаксации, но, тем не менее, траектории не совпадают. В результате возникает петлеобразная диаграмма – петля гистерезиса. Таких эффектов гистерезиса не обнаруживается для зависимости $\Delta R_{\text{эф}}$ от скорости солнечного ветра. Полученный гистерезис связан с тем фактом, что накопление энергии при развитии кольцевого тока на главной фазе бури и ее 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 эволюции бури.

Литература

1. *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. 2020. Т. 60, № 2, с. 281-292.
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. 2021. Т. 61. № 2, с. 160–171.
3. *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. P. 1179.