ВЗАИМОСВЯЗЬ ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ БУРИ 20 НОЯБРЯ 2003 г.: ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА

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

*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн РАН, Санкт Петербург, Россия*

RELATIONSHIP BETWEEN THE COSMIC RAY CUTOFF RIGIDITY AND PARAMETERS OF THE MAGNETOSPHERE DURING A STORM ON NOVEMBER 20, 2003: THE HYSTERESIS PHENOMENA

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

*Sankt-Petersburg Filial of Institute of Terrestrial Magnetism and Radiowave Propagation,
St. Petersburg, Russia*

The correlation between the variations of geomagnetic cutoff rigidity ΔR and geomagnetic activity and parameters of interplanetary magnetic field IMF and solar wind has been calculated during three phases of a magnetic storm on November 20–21, 2003, before the storm began, in its main and recovery phases. On the example of the station Moscow it was found that the trajectories of ΔR depending on the parameters studied during the main phase of the storm did not coincide with the trajectories in the recovery phase, which led to the formation of hysteresis loops. The relationship between ΔR with Dst and Kp was characterized by a narrow hysteresis loop, with IMF parameters by a wide one. For the density and pressure of the solar wind, the hysteresis loops were disordered.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-85-88

Введение

Способность космических лучей (КЛ) проникать внутрь магнитосферы обусловлена их магнитной жесткостью R , которая определяется как момент на единицу заряда. Геомагнитный порог или жесткость геомагнитного обрезания — это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из-за магнитного экранирования. Геомагнитные бури могут существенно уменьшить геомагнитное экранирование из-за уменьшения силы поля внутри магнитосферы как следствие формирования токовых систем. Целью нашей работы было проследить динамику изменений геомагнитных порогов ΔR в зависимости от динамики параметров межпланетной среды и геомагнитосферы во время эволюции магнитной бури 20–21 ноября 2003 г.

Методы исследования и данные

Геомагнитные пороги $\Delta R_{\text{эф}}$ рассчитаны методом прослеживания траекторий частиц КЛ, при котором задается магнитное поле магнитосферы, описанное какой-либо моделью. Нами была использована магнитосферная модель Ts01 [1]. Коэффициенты корреляции k между $\Delta R_{\text{эф}}$ и исследуемыми

параметрами вычислялись для станции Москва (55.47° N , 37.32° E). $\Delta R_{\text{эф}}$ на других станциях качественно не отличаются от $\Delta R_{\text{эф}}$ для Москвы (соответствующие кривые приведены в работе [2]).

Данные о параметрах солнечного ветра (плотность N , скорость V , давление P), ММП (полное поле B , компоненты B_z и B_y , а также азимутальная компонента электрического поля E_y), индексах геомагнитной активности (Kp и Dst) взяты из базы OMNI на сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.

Результаты

Зависимости $\Delta R_{\text{эф}}$ от геомагнитной активности и параметров межпланетной среды существенно отличаются друг от друга на различных этапах развития магнитной бури 20–21 ноября 2003 г. При этом могут меняться не только значения коэффициента корреляции k , но и знак. Наиболее тесная корреляция наблюдается для Dst индекса ($k = 0.99$) и несколько меньшие коэффициенты для Kp . Анализ зависимости $\Delta R_{\text{эф}}$ от ММП показал, что наибольшая корреляция достигалась с B_y компонентой. Корреляция $\Delta R_{\text{эф}}$ с B_z , а также с E_y во время предварительной и главной фаз была несущественной. Значимая связь с B_z и E_y появилась только во время фазы восстановления. Во всех фазах бури фиксировалась значительная связь между $\Delta R_{\text{эф}}$ и всеми динамическими параметрами СВ.

На рис. 1 приведены диаграммы зависимости $\Delta R_{\text{эф}}$ от исследуемых параметров в течение всех трех фаз бури. Рис. 1 позволяет проследить зависимость $\Delta R_{\text{эф}}$ не только от варьируемого аргумента — параметров геомагнитной активности и межпланетной среды, но и от направления изменения аргумента. Рассмотрим панель связи $\Delta R - Dst$ (1a). Видно, что траектория изменения $\Delta R_{\text{эф}}(Dst)$ на восстановительной фазе не совпадает с траекториями на предварительной и главной фазах, хотя кривые лежат достаточно близко друг от друга. Таким образом, полученная зависимость $\Delta R_{\text{эф}}$ от Dst неоднозначна, она имеет петлеобразную форму. Т.е. взаимосвязь $\Delta R_{\text{эф}}$ и Dst обнаруживает признаки гистерезиса с характерной узкой петлей.

Петлеобразная диаграмма возникает как отклик $\Delta R_{\text{эф}}$ также и на циклические изменения других параметров (рис. 1б – рис. 1и). Для ММП корреляция с $\Delta R_{\text{эф}}$ меньше, чем для Dst , при этом она существенно разная на главной и восстановительной фазах. Наблюдается явная асимметрия для B_y ($k = 0.96$ на главной фазе и $k = 0.70$ на восстановительной), для B_z ($k = 0.24$ на главной фазе, $k = 0.69$ на восстановительной) и для B ($k = 0.58$ на главной, $k = -0.94$ на восстановительной фазах). Более низкие k и асимметрия процесса, по-видимому, ответственны за формирование широкой петли гистерезиса.

Отметим, что кривые как узких, так и широких петель гистерезиса показывают регулярное поведение — достаточно монотонное изменение ΔR в зависимости от аргумента во время эволюции бури. Совершенно другое

поведение демонстрируют петли гистерезиса на рис. 1з и 1и, показывающие связь $\Delta R_{эф}$ с динамическими параметрами СВ — плотностью N и давлением P . Траектории $\Delta R(N)$ и $\Delta R(P)$ являются запутанными, кривые многократно пересекают друг друга, что может быть связано с резкими скачками и частыми изменениями N и P во времени на всех фазах бури.

Рис. 1. Петли гистерезиса при взаимодействии $\Delta R_{эф}$ на станции Москва с параметрами СВ, ММП и геомагнитной активности для трех фаз бури 20 ноября 2003 г.: (1) — предварительная, (2) — главная, (3) — восстановительная. Стрелками указано направление течения времени при развитии бури.

Таким образом, геометрия петли гистерезиса, ее вид, форма и/или площадь, по-видимому, может служить новым информативным индексом взаимосвязи $\Delta R_{эф}$ и параметров гелио- и геомагнитосферы. Определение вида и формы этого нового индекса, а также их численных характеристик требует дальнейших исследований с привлечением большого статистического материала.

Заключение

Взаимосвязь вариаций геомагнитных порогов КЛ с параметрами СВ, геомагнитной активности и магнитосферы различна на разных фазах бури,

поскольку определяется динамикой токовых систем, которые в процессе эволюции магнитного возмущения развиваются и затухают различным образом и на разных временных интервалах. Определение однозначных зависимостей $\Delta R_{\text{эф}}$ от конкретной токовой системы на каждом этапе бури является сложной нерешенной задачей, так как еще плохо понято взаимодействие солнечного ветра и магнитосферы. Поэтому весьма актуально введение некоего информативного индекса, помогающего лучше понять реакцию $\Delta R_{\text{эф}}$ на изменение параметров СВ и магнитосферы в процессе эволюции бури. Таким информативным индексом взаимосвязи $\Delta R_{\text{эф}}$ и параметров геомагнитосферы может служить геометрия петель гистерезиса. Однако вид и численные характеристики этого нового индекса требуют дальнейших исследований.

Литература

1. *Tsyganenko, N.A. and Sitnov, M.I.* Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, A03208. <https://doi.org/10.1029/2004JA010798>
2. *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 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 48. № 6. С. 723–740. 2008.