



ЭФФЕКТЫ ГИСТЕРЕЗИСА В ЗАВИСИМОСТЯХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПОРОГОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ОТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ В МАРТЕ 2023 ГОДА.

О.А. Данилова
СПбФ ИЗМИРАН, Санкт Петербург



XXIX Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца
"Солнечная и солнечно-земная физика – 2025"
(ССЗФ-2025)

Аннотация

- Данная работа является продолжением ряда работ по открытому нами несколько лет тому назад явлению гистерезиса для геомагнитных порогов космических лучей во время сильных магнитных бурь. Для сильной магнитной бури в марте 2023 года получены изменения геомагнитных порогов ΔR и показано, что их значения в зависимости от исследуемых параметров во время главной фазы не совпадают с траекторией в восстановительной фазе, что является признаком гистерезиса. Так же проведено исследование изменения геомагнитной активности Dst , связанных с изменением параметров гелиосферы во время возмущения магнитосферы и показано, что получаются петли гистерезиса, аналогичные петлям у геомагнитных порогов. Неоднозначная зависимость ΔR и Dst от исследуемых параметров, которые изменяются циклически при развитии магнитосферных токовых систем и последующей их релаксации, ответственна за формирование петель гистерезиса. Исследованы особенности петель гистерезиса для связи ΔR и Dst с геомагнитными индексами, динамическими и магнитными параметрами солнечного ветра для исследуемого возмущения и проведено их сравнение. Таким образом получено, что для данной бури петли гистерезиса наблюдаются для зависимостей почти от всех параметров, хотя и имеют разную площадь.

Введение

□ Проникновение потоков космических лучей (КЛ) в магнитосферу и атмосферу Земли контролируется магнитным полем Земли, которое является экраном для заряженных частиц. Возможность проникновения заряженных частиц внутрь магнитосферы определяется их магнитной жесткостью R (момент на единицу заряда). Жесткость геомагнитного обрезания/геомагнитный порог КЛ — это жесткость, ниже которой поток частиц отсекается из-за геомагнитного экранирования.

□ Во время магнитных бурь в магнитосфере формируются глобальные системы токов: кольцевой ток, ток на магнитопаузе, магнитосферные хвостовые токи, а также высокоширотные продольные токи. Эти токи снижают напряженность поля внутри магнитосферы, тем самым ослабляя геомагнитное экранирование, т.е. наблюдаются вариации жесткости геомагнитного обрезания $\Delta R_{\text{эф}}$.

□ Целью данной работы является исследование особенностей петель гистерезиса для связи ΔR и Dst с геомагнитными индексами, динамическими и электромагнитными параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля для данного возмущения и проведение их сравнения.

Метод и данные

□ **Метод:** Вертикальные эффективные геомагнитные пороги $R_{\text{эф}}$ получены методом траекторных расчетов в магнитном поле модели Цыганенко TS01 [Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C. Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? J. Geophys. Res. 2003, vol. 108, iss. A5, 1209]. $\Delta R_{\text{эф}}$ определялись как разности между рассчитанными $R_{\text{эф}}$ 23–24 марта 2023 г. и жесткостями в спокойный добуравой период (12 марта). $\Delta R_{\text{эф}}$ рассчитаны для девяти разноширотных станций космических лучей. Станции выбирались таким образом, чтобы в спокойное время они охватывали основную область пороговых жесткостей R_c , подверженных влиянию геомагнитного поля. Координаты и международный код этих станций указан в таблице:

N	Название станции	Международный код	Географ. широта	Географ. долгота	R_c (ГВ)
1	Кингстон (Австралия)	KGSN	42.99° S	147.29° E	1.90
2	Москва (Россия)	MOSC	55.47° N	37.32° E	2.08
3	Новосибирск (Россия)	NVBK	54.80° N	83.00° E	2.32
4	Иркутск (Россия)	IRKT	52.47° N	104.03° E	3.13
5	Юнгфрауйох (Швейцария)	JUNG	46.55° N	7.98° E	4.51
6	Алматы (Казахстан)	AATA	43.25° N	76.92° E	5.21
7	Рим (Италия)	ROME	41.90° N	12.52° E	6.11
8	Афины (Греция)	ATHN	37.97° N	23.72° E	8.48
9	ESOI (Израиль)	ESOI	33.30° N	35.80° E	10.73

□ **Данные:** Параметры солнечного ветра (плотность N , скорость V , давление P), ММП (полное поле B , компоненты B_z и B_y , азимутальная компонента электрического поля E_y и параметр плазмы β), а также индексы геомагнитной активности (Kp и Dst) для получения корреляций взяты из базы OMNI на сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>.

Изменения параметров солнечного ветра во время магнитной бури 23-24.03.2023 г.

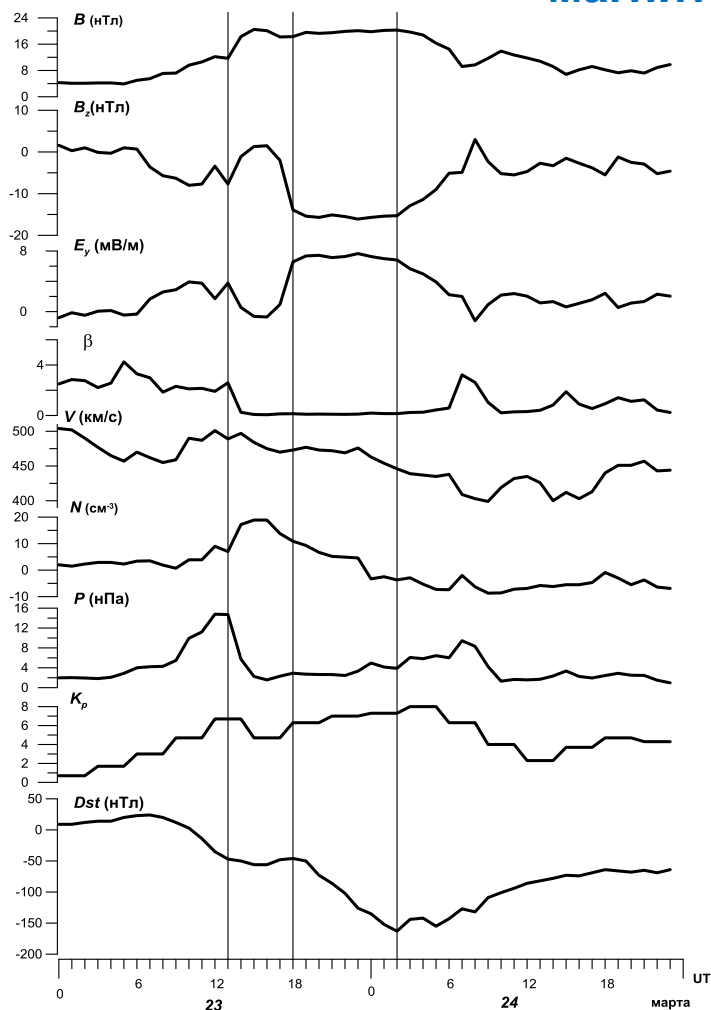


Рисунок 1. Параметры солнечного ветра, ММП и геомагнитной активности во время бури 23–24 марта 2023 г. Вертикальные линии указывают главную фазу бури. Активная стадия главной фазы началась в ~18:00 UT 23 марта.

□ Как видно из рисунка 1, 23 марта в период 07:40 – 14:20 UT общее межпланетное магнитное поле ММП $|B|$, плотность протонов N и динамическое давление P (так же как и южная компонента ММП – B_z) постепенно растут, что означает прохождение около Земли оболочки межпланетного коронального выброса (*ICME's sheath*) или области сжатия перед межпланетными *CME*. Буря вызвана скрытым (*stealth*) корональным выбросом массы (*CME*). *Stealth CME* характеризуются низкой скоростью. Такие *CME* не связаны с какими-либо видимыми проявлениями на Солнце, поэтому их сложно идентифицировать и предсказать их геоэффективность.

□ Главная фаза началась в ~ 13:00 UT ($Dst = -50$ нТл), а активная ее стадия началась в ~ 18:00 UT, когда Dst начинает резко понижаться до $Dst = -163$ нТл в 02:00 UT 24 марта 2023 г.

Вариации геомагнитных порогов во время бури 23–24 марта 2023 г.

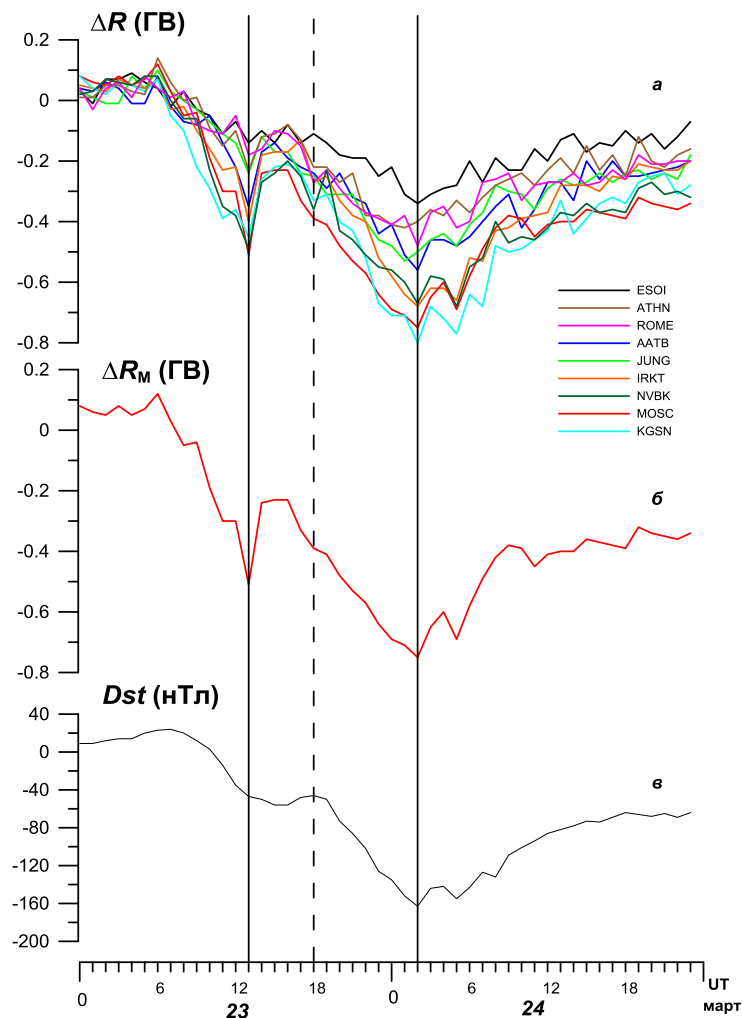


Рисунок 2. Вариации жесткости геомагнитного обрезания и геомагнитного индекса Dst во время бури 23–24 марта 2023 г.

□ На верхней панели (а) рис. 2 показаны вариации геомагнитных порогов $\Delta R_{эф}$ для всех исследуемых станций во время бури 23–24 сентября 2023 г. Видно, что максимальное понижение порогов до ≈ -0.8 ГВ наблюдается на станциях с более высокой широтой: Москва и Кингстон, в 02:00 UT 24 марта во время пика бури (минимум Dst). Кроме того, на всех станциях КЛ виден отрицательный скачок $\Delta R_{эф}$ от 0 до -0.5 ГВ в начале бури. При этом максимальное понижение $\Delta R_{эф} \approx -0.5$ ГВ наблюдается для станции Москва (панель б). Это понижение жесткостей обрезания в начале главной фазы было значительным и составило $\sim 70\%$ от максимального понижения в минимуме Dst (панель в), т.е. в конце главной фазы. Понижение жесткостей обрезания на начальном этапе главной фазы бури является откликом на большой скачок динамического давления $P = 14.79$ в 12:00 UT 23 марта, что свидетельствует о резком сжатии магнитосферы.

Эффекты гистерезиса

Значения ΔR в зависимости от исследуемых параметров во время главной фазы не совпадают с траекторией в восстановительной фазе, что является признаком гистерезиса (рисунок 3). Так же проведено исследование вариаций геомагнитной активности Dst , связанных с изменением параметров гелиосферы во время возмущения магнитосферы и показано, что получаются петли гистерезиса, аналогичные петлям у геомагнитных порогов. За формирование петель гистерезиса ответственна неоднозначная зависимость ΔR и Dst от исследуемых параметров, которые изменяются циклически при развитии магнитосферных токовых систем и последующей их релаксации. На рис. 4 представлены кривые зависимости ΔR и Dst от некоторых параметров для станции Москва. Для других станций принципиальной разницы с данными кривыми не наблюдается.

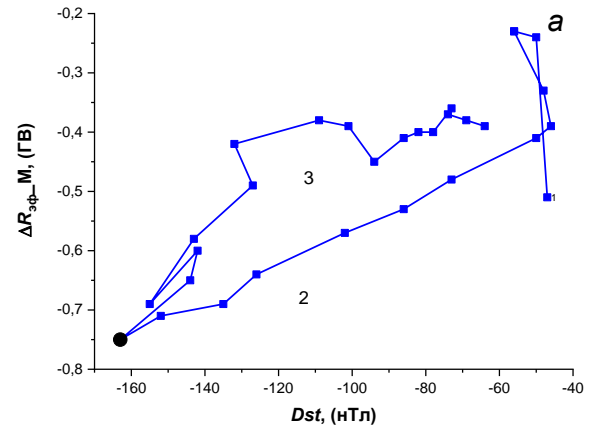


Рисунок 3. Кривая зависимости $\Delta R_{эф}(Dst)$ для станции Москва

Эффекты гистерезиса в зависимостях $\Delta R_{эф}$ и Dst от параметров СВ, ММП

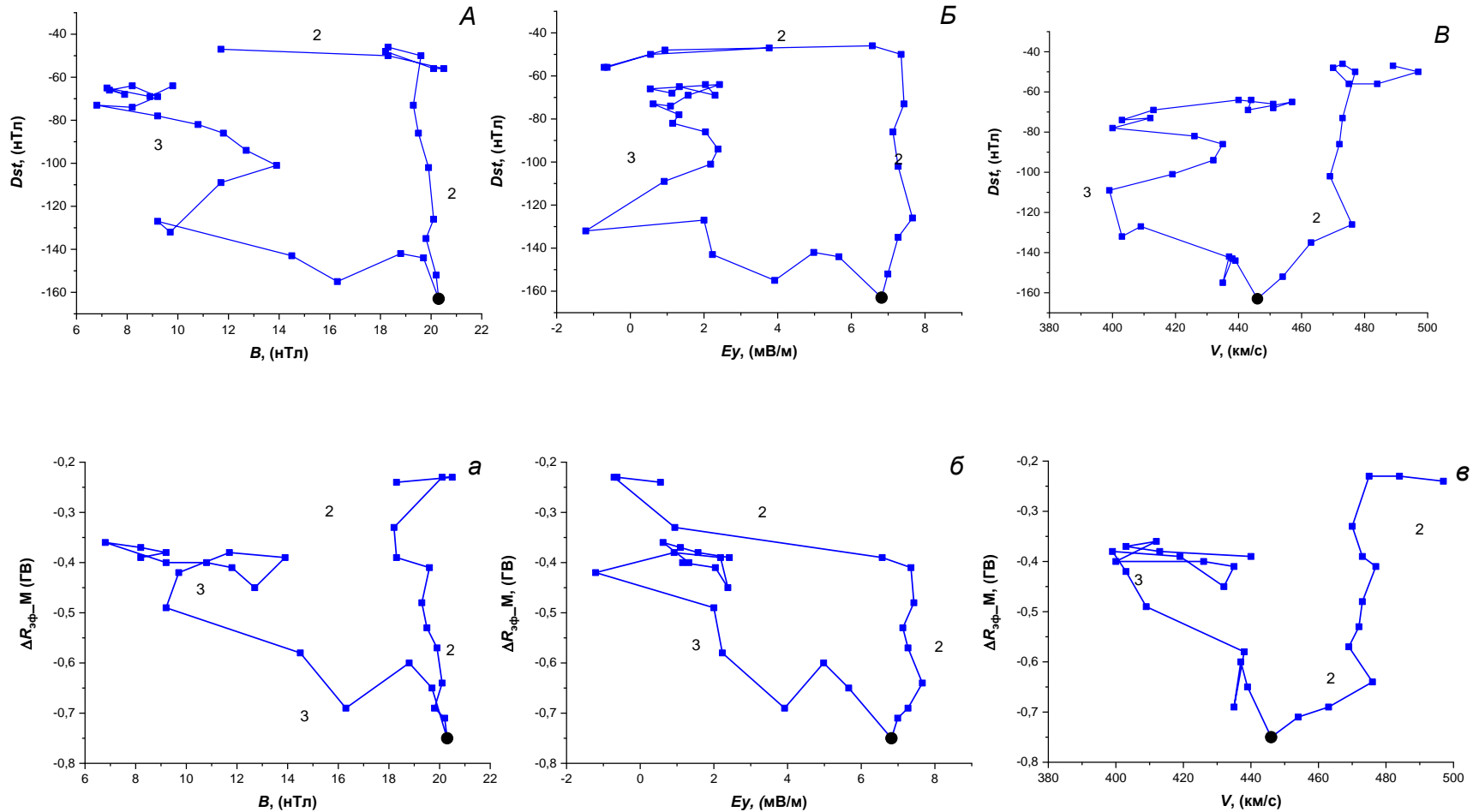


Рисунок 4. Петли гистерезиса для зависимости $\Delta R_{эф}$ и Dst от B , E_y , V для различных фаз бури: 2 -главная, 3-восстановительная. Черный кружок указывает на максимум бури, после чего наступает фаза релаксации.

Выводы

- Проследив, как изменяющиеся условия в СВ и магнитосфере в процессе эволюции магнитной бури 23–24 марта 2023 г. отражаются на поведении жесткостей геомагнитного обрезания КЛ, мы получили, что наибольшее понижение $\Delta R_{\text{эф}}$ наблюдается на главной фазе в максимуме бури ($Dst = -163$ нТл) и составляет -0.8 ГВ (на ст. Кингстон). Кроме того, значительное понижение $\Delta R_{\text{эф}}$ (~ -0.5 ГВ) фиксируется в начале главной фазы как реакция на скачкообразное повышение давления СВ P , которое обусловило сжатие магнитосферы и начало главной фазы бури. Этот скачок $\Delta R_{\text{эф}}$ на всех станциях был отрицательным.
- Величина изменения $\Delta R_{\text{эф}}$ и его направление контролируются относительным вкладом токов на магнитопаузе и кольцевого тока, воздействие которых противоположно [*Flückiger E.O., Smart D.F., Shea M.A. Determination the strength of the ring and the magnetopause currents during the initial phase of geomagnetic storm using cosmic ray data // J. Geophys. Res. V. 95 (A2). P. 1113–1118. 1990.*]. В случае исследуемой бури преимущественное воздействие на движение частиц КЛ сразу после скачкообразного повышения P оказывали эффекты интенсификации кольцевого тока.
- Исследование особенностей петель гистерезиса для связи $\Delta R_{\text{эф}}$ и Dst с геомагнитными индексами, динамическими и электромагнитными параметрами солнечного ветра для данного возмущения показало, что для зависимостей значений Dst получаются петли гистерезиса, аналогичные петлям у геомагнитных порогов. За формирование петель гистерезиса ответственна неоднозначная зависимость ΔR и Dst от исследуемых параметров, которые изменяются циклически при развитии магнитосферных токовых систем и последующей их релаксации.