

---

**ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА В ОТКЛИКЕ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ  
И ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ  
НА ВАРИАЦИИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ**  
**HYSTERESIS PHENOMENA IN THE RESPONSE OF GEOMAGNETIC ACTIVITY  
AND COSMIC RAY PARAMETERS TO VARIATIONS  
IN THE INTERPLANETARY MEDIUM DURING A MAGNETIC STORM**

---

**О.А. Данилова**

*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
Санкт-Петербург, Россия, md1555@mail.ru*

**Н.Г. Птицына**

*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
Санкт-Петербург, Россия, nataliaptitsyna@yahoo.com*

**В.Е. Сдобнов**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, sdobnov@iszf.irk.ru*

**O.A. Danilova**

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, St. Petersburg Branch RAS, St. Petersburg, Russia, md1555@mail.ru*

**N.G. Ptitsyna**

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, St. Petersburg Branch RAS, St. Petersburg, Russia, nataliaptitsyna@yahoo.com*

**V.E. Sdobnov**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, sdobnov@iszf.irk.ru*

---

**Аннотация.** Известно, что динамика интенсивности космических лучей различна на восходящей и нисходящей ветвях 11-летнего солнечного цикла, т. е. наблюдаются явления гистерезиса. Недавно получено, что на более коротких интервалах на масштабе магнитных бурь также могут наблюдаться признаки гистерезиса в зависимостях жесткостей геомагнитного обрезания (ЖГО) космических лучей  $R$  (геомагнитных порогов) от параметров гелио- и геосферы. Параметр  $R$  — это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из-за геомагнитного экранирования. В настоящей работе проведен анализ зависимости геомагнитного буревого индекса  $Dst$  и вариации геомагнитных порогов  $\Delta R$  от параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ) во время двухступенчатой магнитной бури 7–8 сентября 2017 г. Найдены явления гистерезиса в следующих парных рядах: (1) зависимостях  $Dst$  от параметров СВ и ММП и (2) зависимостях  $\Delta R$  от параметров СВ и ММП. Найдено, что кривые на нисходящей фазе бури (главная фаза) и восходящей (фаза восстановления) не совпадают — формируются петли гистерезиса. Специфической чертой исследуемой бури является второе понижение  $Dst$  на восстановительной фазе. Картина гистерезиса отражает эту специфическую динамику бури, формируя две петли как реакцию на два понижения  $Dst$ .

**Ключевые слова:** космические лучи, геомагнитные пороги, жесткости геомагнитного обрезания, суперсуббури, межпланетное магнитное поле, индексы геомагнитной активности.

---

**Abstract.** The dynamics of the intensity of cosmic rays is known to be different on the ascending and descending branches of the 11-year solar cycle, i.e., hysteresis phenomena are observed. Recently, it has been obtained that at shorter intervals on the scale of magnetic storms there are also signs of hysteresis in dependences of cosmic ray cutoff rigidities  $R$  (geomagnetic thresholds) on heliosphere and geosphere parameters.  $R$  is the rigidity below which a particle flux is cut off due to geomagnetic shielding. In this paper, we have analyzed the dependence of the geomagnetic storm index  $Dst$  and the variation of the  $\Delta R$  thresholds on interplanetary magnetic field (IMF) and solar wind (SW) parameters during the two-step magnetic storm on September 7–8, 2017. We have found hysteresis phenomena in the following paired series: (1) dependences of  $Dst$  on SW and IMF parameters, and (2) dependences of  $\Delta R$  on SW and IMF parameters. We have established that the dependence curves in the storm descending phase (main phase) and ascending phase (recovery phase) do not coincide — hysteresis loops are formed. A specific feature of the storm under study is the second lowering of  $Dst$  in the recovery phase. The hysteresis pattern reflects this specific storm dynamics, forming two hysteresis loops in response to the two  $Dst$  drops.

**Keywords:** cosmic rays, geomagnetic threshold, cosmic ray cutoff rigidities, supersubstorm, interplanetary magnetic field, geomagnetic activity.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи (КЛ) представляют собой потоки заряженных энергичных частиц, пронизывающие межпланетное пространство. Они приходят как из ближнего солнечного пространства, так и из дальнего галактического. Проникновение КЛ внутрь магнитосферы контролируется геомагнитным порогом или жесткостью  $R$  геомагнитного обрезания (ЖГО), ниже которой поток частиц обрывается из-за геомагнитного экранирования. На магнитных полюсах  $R$  минимальна (почти нулевая), а в районе экватора увеличивается до вертикальной  $R \sim 15$  ГВ. Во время геомагнитных бурь геомагнитное экранирование уменьшается вследствие уменьшения поля внутри магнитосферы из-за формирования глобальных токовых систем — кольцевого тока, токов магнитопаузы, хвоста магнитосферы и продольных высокоширотных токов. В результате этого космические частицы могут проникать на более низкие широты.

Вариации солнечной активности и интенсивности галактических КЛ показывают эффекты гистерезиса: динамика интенсивности КЛ различна на восходящей и нисходящей ветвях 11-летнего цикла. Эти эффекты на десятилетних временных масштабах более двадцати лет назад были отмечены в работах [Mavromichalaki et al., 1998; Dorman et al., 2001; Kane, 2003]. Авторы соотносили полученный гистерезис с запаздыванием межпланетных процессов, ответственных за модуляцию КЛ, по отношению к соответствующим солнечным процессам и параметрам солнечного ветра (СВ). Недавно было найдено, что для некоторых характеристик КЛ эффекты гистерезиса могут наблюдаться также на более коротких временных масштабах порядка времени развития геомагнитной бури (несколько суток). В работах [Птицына и др., 2021; Данилова и др., 2023] получено, что кривые зависимости изменения порогов  $\Delta R$  от параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и СВ на нисходящей фазе магнитной бури (уменьшение  $Dst$ , главная фаза) и восходящей (фаза восстановления) не совпадают. В результате возникает петлеобразная диаграмма — петля гистерезиса. Кроме того, в работах [Куражковская и др., 2021; Куражковская, Куражковский, 2023] отмечено наличие гистерезиса в зависимости  $Dst$  от плазменного параметра  $\beta$  СВ ( $\beta$ -параметр равен отношению теплового давления к магнитному:  $\beta = NkT/(B^2/(8\pi))$ ) на интервалах времени развития геомагнитных бурь. На базе статистического анализа бурь, наблюдавшихся с 1964 по 2010 г., авторами работ [Куражковская и др., 2021; Куражковская, Куражковский, 2023] получено, что траектория изменения  $Dst$  ( $\beta$ ) на главной фазе бури не совпадает с траекторией на фазе восстановления.

Воздействие солнечных корональных выбросов массы (КВМ), высокоскоростных потоков СВ из корональных дыр на магнитосферу Земли вызывают возмущения геомагнитного поля различной интенсивности. Наиболее сильные геомагнитные бури ( $Dst < -100$  нТл) обусловлены преимущественно транзитными событиями: КВМ и связанными с ними

межпланетными структурами (ударными фронтами, областями сжатия перед межпланетными КВМ, магнитными облаками, и магнитными поршнями [Gosling, 1993; Ермолаев и др., 2010; Richardson, Cane, 2011; Обридко и др., 2013; Kilpua et al., 2017; Дремухина и др., 2019]. В случае взаимодействия КВМ между собой, а также с другими межпланетными образованиями в околоземном пространстве формируются сложные комплексные структуры с повышенной геоэффективностью [Shen et al., 2018; Scolini et al., 2020].

Большой научный интерес вызвало сильное возмущение 6–9 сентября 2017 г. в околоземном пространстве и на Земле, обусловленное прохождением подобной структуры. В это время наблюдалась повышенная солнечная активность, вспышки, КВМ, а также развитие магнитосферного и геомагнитного возмущений, которые сопровождались возникновением очень сильных суббурь, форбуш-понижением в интенсивности КЛ и другими особенностями [Сафаргалеев, Терещенко, 2019; Scolini et al., 2020; Дэспирак и др., 2020; Najra et al., 2020; Ptitsyna et al., 2023]. Мощная геомагнитная буря 7–8 сентября 2017 г. носила двухступенчатый характер и 8 сентября имела два минимума  $Dst$ :  $-142$  нТл в 01:00 UT и  $-124$  нТл в 17:00 UT.

Целью нашей работы была попытка обнаружить явления гистерезиса во время бури 7–8 сентября 2017 г. в парных рядах: 1) в зависимостях  $Dst$  от параметров СВ и ММП; 2) в зависимостях  $\Delta R$  от параметров СВ и ММП. Кроме того, предполагалось исследование особенностей гистерезиса, формирующегося во время этой сложной двухступенчатой бури.

## 1. МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Жесткости геомагнитного обрезания/геомагнитные пороги рассчитывались двумя способами [Ptitsyna et al., 2023]. Первый способ — расчет вертикальных эффективных ЖГО  $R_{эф}$  путем численного интегрирования траекторий заряженных частиц в модельном магнитном поле Земли [McCracken et al., 1962]. Мы использовали модель магнитосферного магнитного поля Цыганенко Ts01 [Tsyganenko, 2002a, b; Tsyganenko et al., 2003], разработанную для возмущенных условий. Эта полуэмпирическая модель построена на основе базы данных спутниковых измерений магнитного поля в период 37 геомагнитных бурь с  $Dst \leq -65$  нТл. Основными источниками магнитного поля модели Ts01 являются симметричный и частичный круговые токи, продольные токи Биркеланда (1 и 2 региона), система токов хвоста магнитосферы и поверхностные токи на магнитопаузе. В Ts01 качестве входных параметров, определяющих влияние межпланетных условий на магнитосферу, используются  $Dst$ -индекс, плотность и скорость СВ, а также три компонента ММП. Эти входные параметры взяты из базы данных OMNI (Geopack-2008, [http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html]). Вычисленные таким образом изменения геомагнитных порогов  $\Delta R_{эф}$  далее называем модельными.

Второй способ определения вариаций геомагнитных порогов  $\Delta R_{\text{срс}}$  — использование метода спектрографической глобальной съемки (СГС). Метод СГС по данным наземных измерений интенсивности КЛ на мировой сети станций позволяет получать информацию о вариациях КЛ, обусловленных процессами в межпланетном пространстве, магнитосфере и атмосфере Земли, что дает возможность получать вариации жесткостного дифференциального спектра КЛ на границе магнитосферы, питч-угловую анизотропию КЛ в межпланетном пространстве, а также изменения планетарной системы ЖГО в каждый момент времени [Kovalev et al., 2022]. При этом используется весь имеющийся в настоящее время комплекс наземной регистрирующей аппаратуры (мировая сеть нейтронных мониторов, расположенных на любых уровнях в атмосфере Земли, наземные и подземные мезонные телескопы и т. д.). Статистическая ошибка в определении  $\Delta R_{\text{срс}}$  с учетом статистической точности измерений на станциях КЛ мировой сети по абсолютной величине не превышает 0.05 ГВ. Вариации ЖГО, полученные этим методом, далее называются наблюдательными.

Изменения ЖГО  $\Delta R_{\text{эф}}$  и  $\Delta R_{\text{срс}}$  определялись как разности между ЖГО, рассчитанными на каждый час в период бури 7–8 сентября 2017 г., и ЖГО в спокойный период перед бурей. За спокойные ( $Dst \approx 0$ ) были взяты среднесуточные значения порогов 6 сентября 2017 г.

Расчеты проводились для следующих станций: ESOI (Израиль, 33.30° N, 35.80° E), ААТВ (Алматы, Казахстан, 43.20° N, 76.94° E), ROME (Рим, Италия, 41.90° N, 12.52° E), IRKT (Иркутск, Россия, 52.47° N, 104.03° E), MOSC (Москва, Россия, 55.47° N, 37.32° E) и KGSN (Кингстон, Австралия, 42.99° S, 147.29° E). Станции выбирались таким образом, чтобы в спокойное время они охватывали основную область пороговых ЖГО  $R_c$ , подверженных влиянию геомагнитного поля: ESOI — 10.29, ROME — 6.15, ААТВ — 5.94, IRKT — 3.17, MOSC — 2.11, KGSN — 1.88 ГВ. Для 2017 г. использована сетка ЖГО для эпохи 2020 г. и все результаты рассчитывались относительно эпохи 2020 г. по программе с сайта [https://tools.izmiran.ru/cutoff/].

Для расчета  $\Delta R_{\text{срс}}$  использовались данные мировой сети станций КЛ [https://www.nmdb.eu]. Для вычисления  $\Delta R_{\text{эф}}$  и гистерезисных диаграмм использовались часовые значения параметров СВ (плотность  $N$ , скорость  $V$ , давление  $P$ ), ММП (полное поле  $B$  и компоненты  $B_y$  и  $B_z$ ), а также азимутальная компонента электрического поля  $E_y$ ,  $\beta$ -параметр плазмы и  $Dst$  из базы OMNI на сайте [https://omniweb.gsfc.nasa.gov].

Плазменное  $\beta$  — это отношение давления плазмы к магнитному давлению; в базе OMNI этот параметр рассчитывается по формуле

$$\beta = \left( \frac{4.16T}{10^5} + 5.34 \right) \frac{N_p}{B^2},$$

где  $T$  — температура (К);  $N_p$  — плотность протонов ( $\text{см}^{-3}$ );  $B$  — полное магнитное поле (нТл).

Электрическое поле рассчитывалось по формуле

$$E (\text{мВ/м}) = -V (\text{км/с}) B_z (\text{нТл}) \cdot 10^{-3}.$$

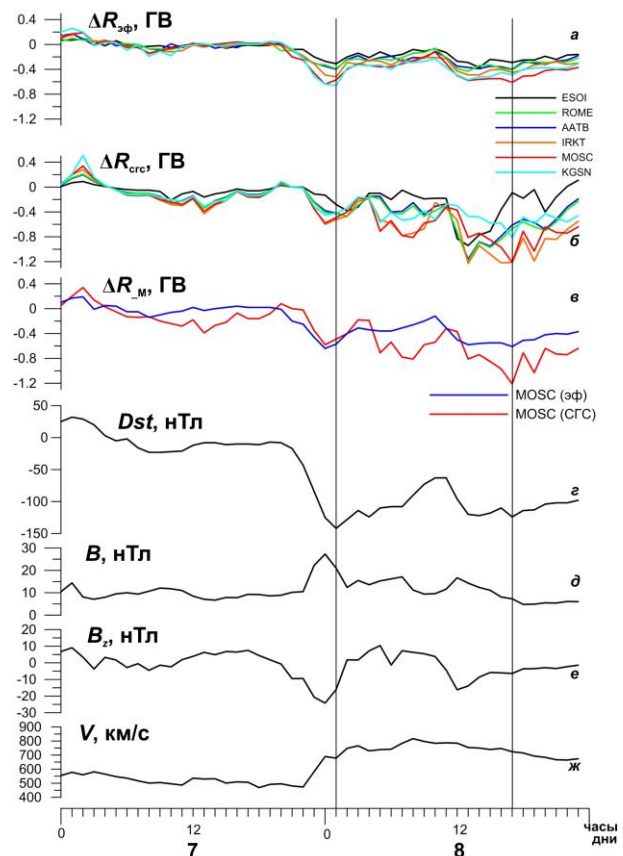


Рис. 1. Вариации геомагнитных порогов  $\Delta R_{\text{эф}}$ ,  $\Delta R_{\text{срс}}$  и некоторых параметров ММП и СВ во время бури 7–8 сентября 2017 г. Вертикальные линии — два падения  $Dst$ :  $Dst_{\text{min1}}$  и  $Dst_{\text{min2}}$

## 2. БУРЯ 7–8.09.2017 И ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПОРОГОВ

На рис. 1 показаны вариации геомагнитных порогов  $\Delta R_{\text{эф}}$  (а) и  $\Delta R_{\text{срс}}$  (б) 7–8 сентября 2017 г. Пороги  $\Delta R_{\text{срс}}$  и  $\Delta R_{\text{эф}}$  вычислены двумя методами для каждой из шести станций. Для более детального сравнения на отдельную панель вынесены изменения ЖГО  $\Delta R_{\text{срс}}$  и  $\Delta R_{\text{эф}}$  для ст. «Москва» (в). Показаны также  $Dst$  (г) и некоторые параметры СВ и ММП, характеризующие бурю:  $V$ ,  $B$  и  $B_z$  ММП (д–ж).

Видно, что магнитная буря достигла максимума  $Dst_{\text{min1}} = -144$  нТл в ~01:00 UT 8 сентября, ее главной фазе предшествовал КВМ. Особенностью бури является негладкое поведение временного профиля  $Dst$  на восстановительной фазе с дополнительным падением  $Dst_{\text{min2}}$ , связанным с приходом другого КВМ.

Видно, что в общих чертах изменения ЖГО следуют за изменениями  $Dst$ . Это свидетельствует о том, что основной вклад в вариации ЖГО вносит кольцевой ток.

На рис. 1 видно, что максимальное падение модельных порогов  $\Delta R_{\text{эф}} = -0.66$  ГВ наблюдается во время первого минимума  $Dst_{\text{min1}}$  в конце главной фазы. Максимальное падение наблюдательных порогов  $\Delta R_{\text{срс}} = -1.21$  ГВ на восстановительной фазе во время дополнительного падения  $Dst_{\text{min2}} = -124$  нТл.

Таким образом, ясно заметна разница в отклике наблюдательных  $\Delta R_{\text{срс}}$  и модельных  $\Delta R_{\text{эф}}$  ЖГО на средних широтах (ст. «Москва»).

### 3. ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА

#### 3.1. Зависимость $\Delta R$ от $Dst$

Мы исследовали зависимость  $\Delta R$ , рассчитанных двумя методами, от бурового индекса  $Dst$  на примере ст. «Москва». Диаграммы зависимости  $\Delta R_{эф}(Dst)$  и  $\Delta R_{срс}(Dst)$  приведены соответственно на рис. 2, а, б. Фокус исследования был на разнице эффектов, получаемых на различных фазах бури. Показаны зависимости на главной (синие кружки) и восстановительной (красные кружки) фазах. Отметим, что начальная фаза (несколько точек, сгруппированных вблизи  $Dst=0 \div 10$  нТл) не выделена отдельным цветом, чтобы не усложнять картину. Направление времени протекания процессов совпадает с направлением стрелки.

Рассмотрим зависимость  $\Delta R_{эф}$  от  $Dst$  (панель а). Во время бури  $Dst$  меняется циклически, что видно на рис. 1, з и 2: на главной фазе уменьшается до  $Dst_{min1}$ , затем на восстановительной фазе растет, проходя через дополнительное понижение  $Dst_{min2}$ . На панели а видно, что после начала бури происходит падение  $\Delta R_{эф}$  до момента максимума бури  $Dst_{min1}$ , затем главная фаза сменяется восстановительной фазой бури, во время которой значения  $\Delta R$  растут. Таким образом, поведение  $\Delta R_{эф}$  повторяет поведение  $Dst$ . Однако полученная зависимость  $\Delta R_{эф}(Dst)$  неоднозначна, она имеет петлеобразную форму: одно и то же значение  $\Delta R_{эф}$  получается при различных  $Dst$ . На панели а можно проследить зависимость  $\Delta R_{эф}$  не только от варьируемого аргумента  $Dst$ , но и от направления изменения аргумента. Последняя зависимость является признаком гистерезиса. Видно, что нисходящая и восходящая кривые зависимости  $\Delta R_{эф}(Dst)$  (главная и восстановительная фазы бури) идут по разным траекториям, в результате образуется петля гистерезиса, которая отражает реакцию  $\Delta R_{эф}$  на понижение  $Dst_{min1}$  (падение и затем рост  $\Delta R$ ).

Зависимость  $\Delta R_{срс}(Dst)$  (панель б) образует более сложную картину. Кривая  $\Delta R_{срс}(Dst)$  на участке главной фазы до  $Dst_{min1}$  аналогична кривой  $\Delta R_{эф}(Dst)$ , но далее  $\Delta R_{срс}$  реагирует также на второе понижение  $Dst_{min2}$  на восстановительной фазе бури. Видно, что начавшийся рост  $\Delta R_{срс}$  прерывается резким падением, после которого снова продолжается рост порогов. В результате восходящая кривая  $\Delta R_{эф}(Dst)$  на восстановительной фазе бури содержит вторую открытую петлю гистерезиса как реакцию на  $Dst_{min2}$ .

Поскольку специфической чертой исследуемой бури является добавочное понижение  $Dst_{min2}$  на восстановительной фазе, можно заключить, что гистерезис наблюдательных значений  $\Delta R_{срс}$ , формируя две петли (как реакцию на оба понижения  $Dst_{min1}$  и  $Dst_{min2}$ ), лучше отображает специфику бури, чем гистерезис модельных значений  $\Delta R_{эф}$ .

#### 3.2. Зависимость $Dst$ и $\Delta R$ от магнитных и электрических параметров солнечного ветра

В этом параграфе проведен анализ данных с целью обнаружения явлений гистерезиса во взаимосвязи

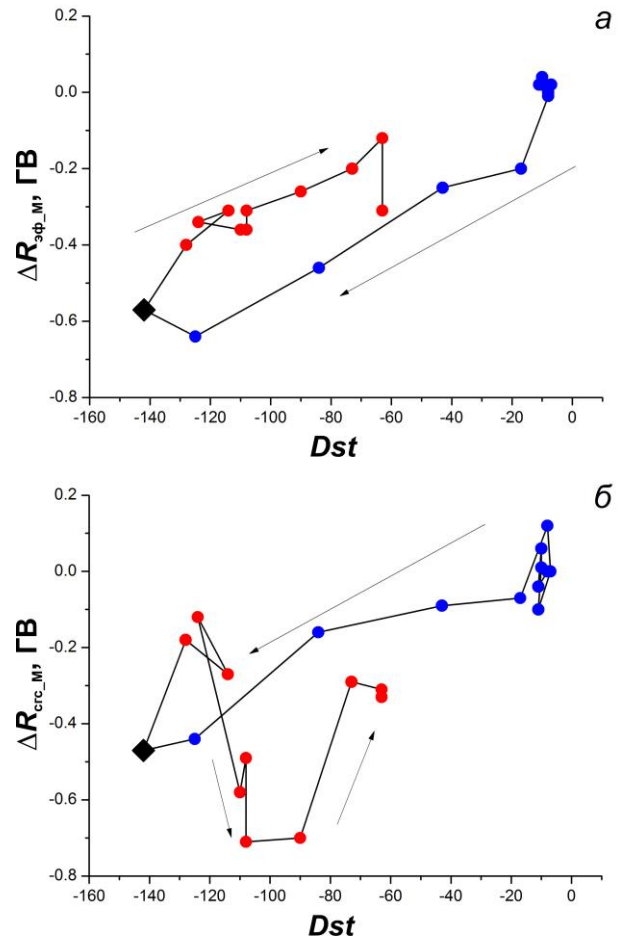


Рис. 2. Зависимости: а —  $\Delta R_{эф}(Dst)$ ; б —  $\Delta R_{срс}(Dst)$  на ст. MOSC. Синие кружки — главная фаза бури, красные — восстановительная. Черный ромб — максимум бури  $Dst_{min1}$ . Направление времени протекания процессов совпадает с направлением стрелки

трех парных рядов во время бури 7–8 сентября 2017 г.: 1) в зависимостях  $Dst$  от  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  и  $\beta$ ; 2) в зависимостях  $\Delta R_{эф}$  от  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  и  $\beta$ ; 3) в зависимостях  $\Delta R_{срс}$  от тех же параметров межпланетной среды. Результат анализа для ст. Москва показан на рис. 3 в виде диаграмм зависимости  $Dst$  от  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  и  $\beta$ , панели а–з показывают зависимость  $Dst$  от  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  и  $\beta$ , панели д–з — зависимость модельных  $\Delta R_{эф}$  от  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  и  $\beta$ , панели и–м — зависимость наблюдательных  $\Delta R_{срс}$  от тех же параметров.

Рассмотрим динамику  $Dst$  во время двухступенчатой бури в зависимости от магнитных и электрических параметров СВ (панели а–з). На диаграмме зависимости  $Dst(B)$  (а) видно, что  $B$  меняется от значений порядка  $5 \div 10$  нТл в начале бури, затем на главной фазе растет до максимума 28 нТл за 1 ч до максимума бури, после чего уменьшается до 10 нТл. Такое циклическое изменение  $B$  сопровождается циклическим изменением  $Dst$ : падение на главной фазе до минимума  $Dst_{min1}$  в минимуме бури и последующий рост. Кривая  $Dst(B)$  показывает петлеобразную зависимость, так как нисходящая часть кривой (синие точки на главной фазе) не совпадает с частью кривой на восходящей части (красные точки на восстановительной фазе). Видно, что при циклических



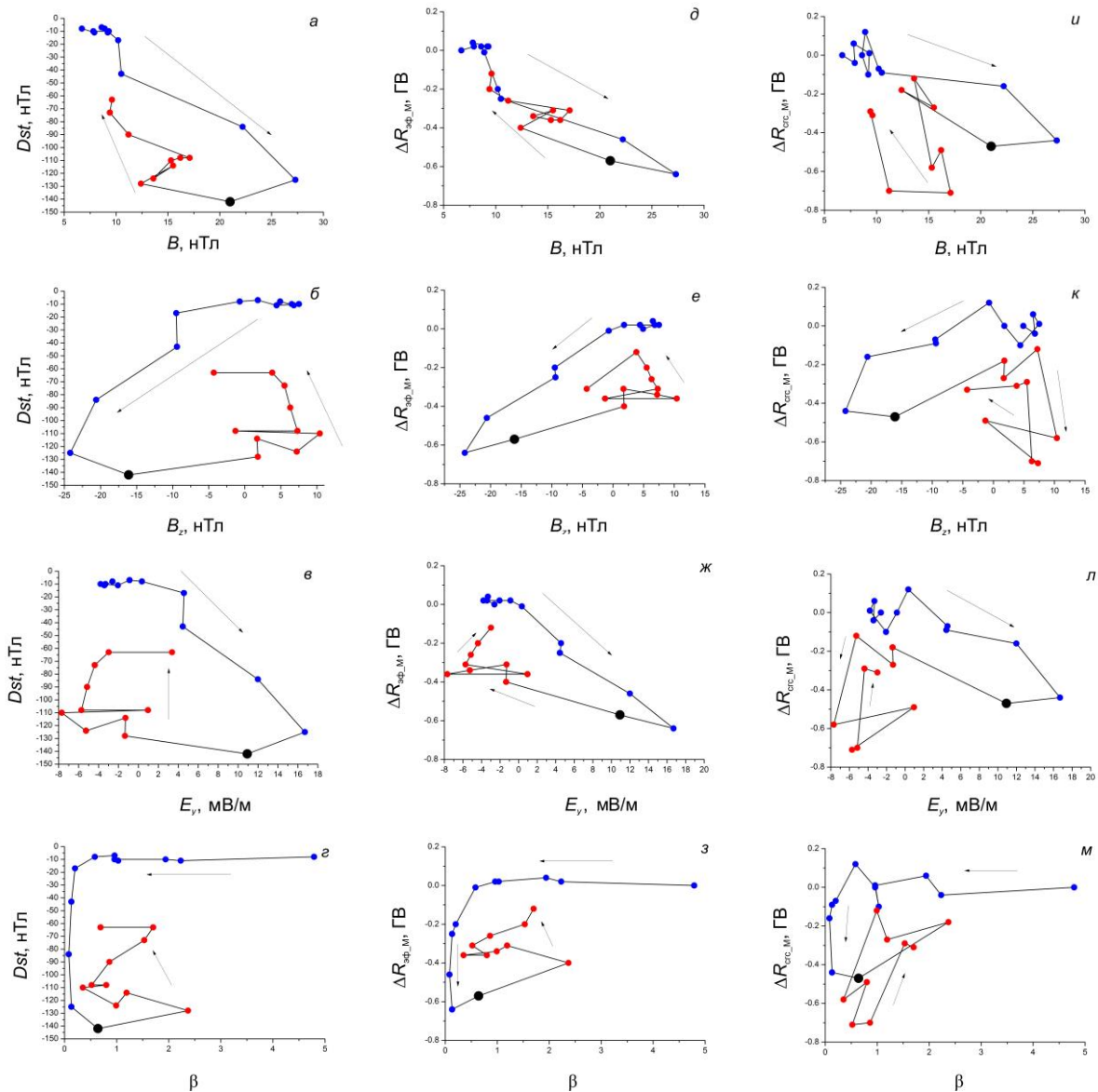


Рис. 3. Петли гистерезиса для зависимости  $Dst$  и  $\Delta R$  от параметров межпланетного магнитного и электрического полей. Синие кружки — главная фаза, красные — восстановительная. Направление времени протекания процессов совпадает с направлением стрелки

изменения  $B_z$ ,  $E_y$  и  $\beta$  ( $\beta$ - $\varepsilon$ ) формируются аналогичные гистерезисные петли для зависимостей  $Dst(B_z, E_y, \beta)$ . Отметим, что восходящие ветви петель (фаза восстановления) не являются гладкими, они искажаются скачками магнитных и электрических параметров СВ на второй ступени бури. Одно из отличий полученных петель гистерезиса состоит в том, что для  $Dst(B, E_y)$  обход цикла проходит по часовой стрелке, а для  $Dst(B_z, \beta)$  — против. Кроме того, можно отметить разную ширину полученных гистерезисных петель, что, по-видимому, связано со степенью симметрии/асимметрии исходного процесса [Серенсен и др., 1975; Атабеков, 2009].

Панели  $d$ – $z$  также показывает признаки гистерезиса в зависимости  $\Delta R_{\text{св}}$  от параметров ММП и электрического поля. Видно, зависимость  $\Delta R_{\text{св}}$  от одного из аргументов  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  или  $\beta$  так же, как и диаграммы левого ряда панелей, характеризуются двумя вет-

вями: нисходящей (начальная и главная фазы бури) и восходящей (восстановительная). На нисходящей ветви геомагнитный порог уменьшается, на восходящей растёт. Панели  $d$ – $z$  показывают неоднозначность связи переменных  $\Delta R_{\text{св}}$  и параметров  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  и  $\beta$ . Траектория  $\Delta R_{\text{св}}$ , т. е. последовательные значения, которые принимает  $\Delta R_{\text{св}}$  в зависимости от параметров  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  и  $\beta$  на главной фазе (синие символы), существенно образом не совпадает с траекторией на восстановительной фазе (красные символы), при этом формируются петли гистерезиса. Для зависимостей  $\Delta R_{\text{св}}(B, B_z, E_y, \beta)$  петли гистерезиса аналогичны петлям зависимостей  $Dst(B, B_z, E_y, \beta)$ . Однако в этом случае видны две петли как отражение двух понижений  $Dst_{\text{min}1}$  и  $Dst_{\text{min}2}$ .

Панели  $u$ – $m$  также показывают признаки гистерезиса в зависимости  $\Delta R_{\text{св}}$  от параметров ММП. Для  $\Delta R_{\text{св}}(B, B_z, E_y, \beta)$  нисходящие части петель

(главная фаза) практически совпадают с кривыми на диаграммах левых и центральных панелей, т. е. с  $Dst$  и  $\Delta R_{эф}(B, B_z, E_y, \beta)$ . Однако на восстановительной фазе бури ( $u-m$ ) видны две петли как отражение двух понижений  $Dst_{min1}$  и  $Dst_{min2}$ .

В зависимостях  $\Delta R_{эф}$  от параметров ММП также просматривается маленькая дополнительная петля как реакция на второе понижение  $Dst_{min2}$ , но она гораздо меньше выражена.

### 3.3. Зависимости $Dst$ и $\Delta R$ от динамических параметров СВ

На рис. 4 показана зависимость  $Dst$  ( $a-e$ ),  $\Delta R_{эф}$  ( $z-e$ ) и  $\Delta R_{срс}$  ( $ж-u$ ) от динамических параметров  $V$ ,  $N$  и  $P$  при различных магнитных и электрических параметрах СВ во время бури.

Зависимости  $Dst$  и геомагнитных порогов от динамических параметров СВ имеют более сложный характер и менее определенный в смысле выявления признаков гистерезиса. На панелях  $a-e$  видны неоднозначные зависимости  $Dst(V, N, P)$  — формируется подобие открытых петель гистерезиса. Для зависимости  $Dst(N$  и  $P)$  формируется вторая петля как реакция на второй минимум  $Dst_{min2}$ . На панелях  $z-e$  зависимость  $\Delta R_{эф}$  от динамических параметров СВ практически повторяет кривые зависимостей  $Dst(V, N, P)$ , показывая подобие гистерезиса. Вторая петля четко видна только для зависимости  $\Delta R_{эф}(N)$ . Панели  $ж-u$  показывают, что кривые  $\Delta R_{срс}(V, N, P)$  образованы множественными пересекающимися линиями и образуют некоторый аналог открытого гистерезиса. Таким образом, видно, что кривые зависимости  $Dst$ ,  $\Delta R_{эф}$  и  $\Delta R_{срс}$  от динамических параметров СВ формируют лишь некое подобие гистерезисных петель, демонстрируя менее выраженные признаки гистерезиса, чем аналогичные зависимости от магнитных и электрических параметров.

## 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ показал, что во время развития бури 7–8 сентября 2017 г. при циклическом изменении параметров СВ и ММП наблюдаются явления гистерезиса во взаимосвязи этих параметров с  $Dst$  и  $\Delta R$ . Признаки гистерезиса особенно очевидны для связи с магнитными и электрическими характеристиками  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  и  $\beta$ . Наш результат для связи  $Dst$  и  $\beta$  поддерживает выводы работы [Куражковская, Куражковский, 2023], где подтверждено наличие гистерезиса в зависимости  $Dst(\beta)$  на масштабах геомагнитных бурь. Кривые зависимости геомагнитных порогов от динамических параметров СВ носят более хаотический характер, демонстрируя лишь подобие гистерезиса. Это согласуется с работами [Птицына и др., 2021; Данилова и др., 2023], в которых было показано, что во время бурь осенью 2003 и 2004 г. петли гистерезиса наиболее явно видны для зависимости  $\Delta R$  от магнитных параметров.

Динамика ЖГО при развитии бури является отражением взаимодействия СВ и ММП с геомагнитосферой в этот период времени (см., например, [Кичигин и др., 2017; Птицына и др., 2019]). Буревая активность прослеживается по изменениям  $Dst$ , ос-

новным источником которых для сильных бурь является кольцевой ток. В начальной фазе магнитной бури происходит пересоединение силовых линий межпланетного и геомагнитного полей и флуктуации размеров магнитосферы (они зависят от количества движения потока солнечной плазмы), что приводит к проникновению новых частиц в магнитосферу или ускорению имеющейся в ней плазмы до энергий порядка тысяч электронвольт. На фазе восстановления геомагнитных бурь происходит распад кольцевого тока за счет кулоновского рассеяния и зарядового обмена протонов с нейтральным атмосферным водородом. При этом время насыщения кольцевого тока и его распада различны [Kozuza, Liemohn, 2003]. Можно предположить, что в результате этого накопление энергии при развитии кольцевого тока на главной фазе бури и ее высвобождение на восстановительной фазе происходят несимметрично, что является признаком гистерезиса. В пользу такого предположения свидетельствуют результаты работы [Cai et al., 2009], в которой проведено моделирование взаимодействия электромагнитных частиц с магнитосферой Земли. Авторами показано, что при циклическом изменении  $|B_z|$  от 0 до максимума и обратно при достижении некоторого критического значения  $|B_z|$  происходит существенное уменьшение размера дневной магнитосферы. В результате магнитное поле трансформируется к форме с уменьшенной симметрией, в которой возникают диссипативные процессы, позволяющие поглощать излишек энергии, поступающей из СВ. Авторы работы [Cai et al., 2009] приходят к выводу, что при передаче энергии СВ магнитосфере через диссипативные процессы некоторая часть этой энергии не восстанавливается. При этом восстановление размера и формы магнитосферы на восстановительной фазе бури следует другим путем, чем на главной фазе, формируя тем самым петлю гистерезиса.

Полученная разница результатов для модельных и наблюдательных ЖГО требует отдельного рассмотрения. Исследования на базе спутниковых измерений и модельных вычислений показали, что кроме кольцевого тока, дополнительным источником изменений  $Dst$  могут являться также токи хвоста магнитосферы [Alexeev et al., 1996; Калегаев, 2010; Asikainen et al., 2010]. При этом соотношение вкладов этих токовых систем зависит от интенсивности бури: очень сильные бури ( $Dst_{min} < -200$  нТл) определяются в основном кольцевым током, во время менее интенсивных возмущений ( $-200$  нТл  $< Dst_{min} < -100$  нТл) вклад токов хвоста становится сравнимым с вкладом кольцевого тока. Энергия, запасенная в хвосте магнитосферы, в том числе в более дальней ее части, ответственна за ряд важных магнитосферных процессов [Borovsky et al., 1998; Ganushkina et al., 2018]. Модель Ts01, используемая нами для вычисления  $R_{эф}$ , описывает возмущенное магнитное поле магнитосферы в области  $R \leq 15R_E$  и не учитывает влияние поля среднего и дальнего хвоста. В то же время регистрируемые на земле КЛ, регистрируемые на Земле для определения  $\Delta R_{срс}$ , находятся под воздействием магнитного поля всей магнитосферы. Таким образом,  $\Delta R_{срс}$  может

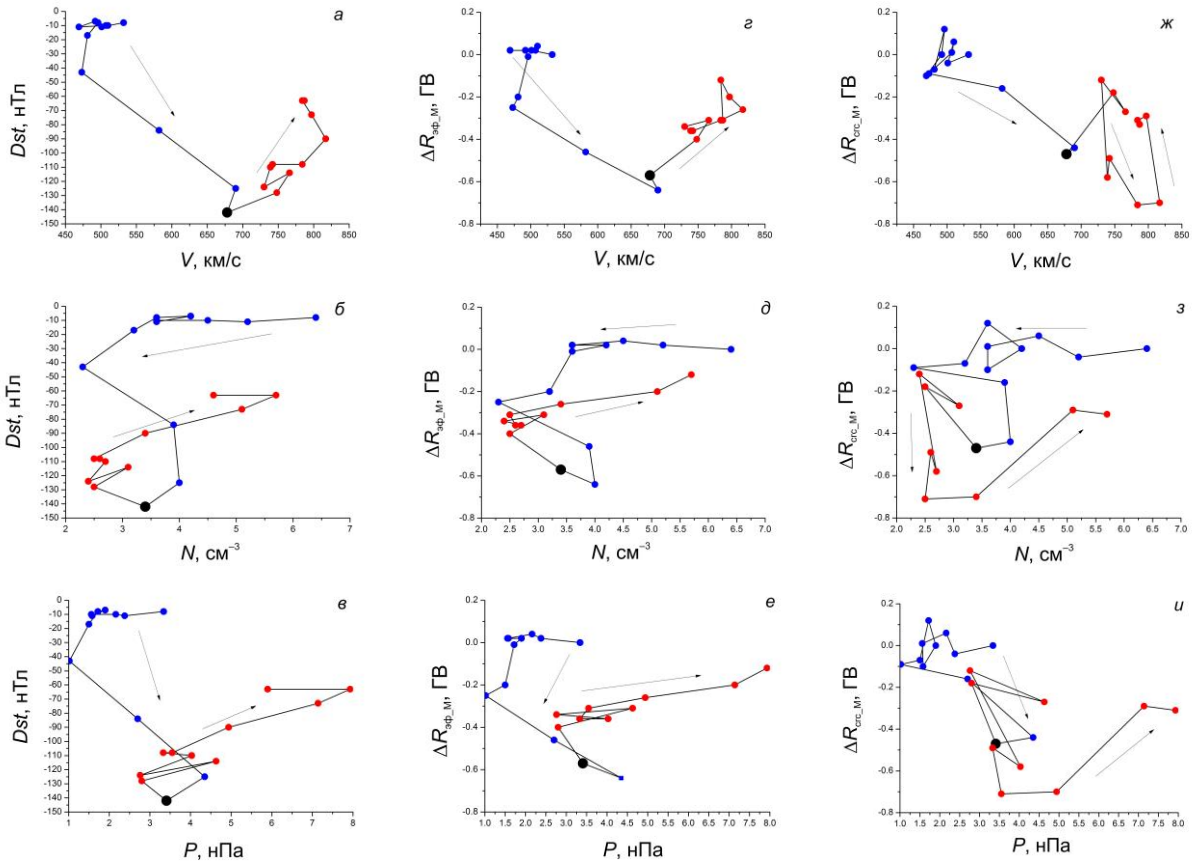


Рис. 4. Зависимость  $Dst$  и вариаций геомагнитных порогов  $\Delta R_{эф}$  и  $\Delta R_{срс}$  от динамических параметров СВ  $V$ ,  $N$ , и  $P$ . Синие кружки — главная фаза, красные — восстановительная. Направление времени протекания процессов совпадает с направлением стрелки

отражать реакцию КЛ на изменения токов хвоста магнитосферы лучше, чем  $\Delta R_{эф}$ . Вклад токов хвоста во время второго минимума  $Dst_{min2}$  больше, чем во время первого  $Dst_{min1}$ , поэтому разница между реакцией  $\Delta R_{эф}$  и  $\Delta R_{срс}$  в это время более заметна. Если в гистерезисе  $\Delta R_{эф}$  вторая петля как реакция на второе понижение значений  $Dst$  только намечена, то в зависимостях  $\Delta R_{срс}$  от параметров магнитосферы четко прослеживаются две петли. Таким образом, разница полученных эффектов гистерезиса для  $\Delta R_{эф}$  и  $\Delta R_{срс}$ , по-видимому, связана с разной чувствительностью модельных и наблюдательных порогов к относительным вкладам различных токовых систем в ход изменения  $Dst$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование сложной бури 7–8 сентября 2017 г. с целью обнаружения возможных явлений гистерезиса во взаимосвязи трех парных рядов: 1) в зависимостях  $Dst$  от магнитных и динамических параметров СВ и ММП ( $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$ ,  $\beta$ ,  $V$ ,  $N$  и  $P$ ); 2) в зависимостях модельных порогов  $\Delta R_{эф}$  от тех же характеристик межпланетной среды; 3) в зависимостях наблюдательных  $\Delta R_{срс}$  от тех же параметров.

В результате анализа впервые получено, что траектории изменения  $Dst$  в зависимости от ММП и электрического поля  $B$ ,  $B_z$ ,  $E_y$  на главной фазе бури отличаются от траектории на восстановительной фазе —

формируется четкая петля гистерезиса. Гистерезисные петли образуются также для геомагнитных порогов  $\Delta R_{эф}$  и  $\Delta R_{срс}$ , рассчитанных двумя независимыми методами. Специфической чертой исследуемой бури является второе понижение  $Dst$  на восстановительной фазе. Гистерезис в зависимости наблюдательных значений  $\Delta R_{срс}$  от параметров магнитосферы лучше отражает эту специфическую динамику бури. Кривые  $\Delta R_{срс}(B, B_z, E_y, \beta)$  образуют две четкие петли гистерезиса как реакцию на два понижения  $Dst$ .

По нашему мнению, гистерезис объясняется различием во временах насыщения кольцевого тока и его распада. В этом случае накопление энергии при развитии кольцевого тока на главной фазе бури и ее высвобождение на восстановительной фазе происходят несимметрично — таким образом, формируются петли гистерезиса. Асимметричный вклад в развитие бури могли вносить и другие токовые системы, которые развиваются и загибают на разных временных масштабах. Однако возмущенная магнитосфера представляет собой сложную многофакторную систему, которая недостаточно понятна в настоящее время. Поэтому для более конкретных выводов о влиянии всех компонентов этой системы на  $\Delta R$  требуются дополнительные исследования.

Авторы благодарны за возможность использования базы данных OMNI [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>]. Работа выполнена частично при финансовой поддержке



Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Результаты для  $\Delta R_{\text{ср}}$  получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>] и научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (сеть СКЛ) [<https://ckp-rf.ru/usu/433536>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атабеков Г.И. *Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи*. СПб.: Лань, 2009. 592 с.

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И. Явления гистерезиса во взаимосвязи жесткости обрезания космических лучей и параметров магнитосферы во время бури 15 мая 2005 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2023. Т. 63, № 4. С. 481–487. DOI: [10.31857/S001679402360014X](https://doi.org/10.31857/S001679402360014X).

Дремухина Л.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Динамика межпланетных параметров и геомагнитных индексов в периоды магнитных бурь, инициированных разными типами солнечного ветра. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59, № 6. С. 683–695. DOI: [10.1134/S0016794019060063](https://doi.org/10.1134/S0016794019060063).

Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И. и др. Суперсуббури во время бурь 7–8 сентября 2017 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020. Т. 60, № 3. С. 308–317. DOI: [10.31857/S0016794020030049](https://doi.org/10.31857/S0016794020030049).

Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури. *Космические исследования*. 2010. Т. 48, № 6. С. 499–515.

Калегаяев В.В. Динамические модели магнитного поля. *Солнечно-земная физика*. 2010. Вып. 16. С. 60–69.

Кичигин Г.Н., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Параметры токовых систем в магнитосфере по данным наблюдений космических лучей в период магнитной бури в июне 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 3. С. 15–19. DOI: [10.12737/szf-33201702](https://doi.org/10.12737/szf-33201702).

Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю. Эффект гистерезиса между индексами геомагнитной активности ( $A_p$ ,  $Dst$ ) и параметрами межпланетной среды в 21–24 циклах солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 73–82. DOI: [10.12737/szf-93202308](https://doi.org/10.12737/szf-93202308).

Куражковская Н.А., Зотов О.Д., Клайн Б.И. Связь развития геомагнитных бурь с параметром  $\beta$  солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 25–34. DOI: [10.12737/szf-74202104](https://doi.org/10.12737/szf-74202104).

Обридко В.Н., Каноиди Х.Д., Митрофанова Т.А., Шельтинг Б.Д. Солнечная активность и геомагнитные возмущения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2013. Т. 53, № 2. С. 157–166. DOI: [10.7868/S0016794013010148](https://doi.org/10.7868/S0016794013010148).

Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Влияние параметров солнечного ветра и геомагнитной активности на вариации жесткости обрезания космических лучей во время сильных магнитных бурь. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59, № 5. С. 569–577. DOI: [10.1134/S0016794019050092](https://doi.org/10.1134/S0016794019050092).

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. DOI: [10.31857/S0016794021010120](https://doi.org/10.31857/S0016794021010120).

Сафаргалеев В.В., Терещенко П.Е. Пульсации герцового диапазона на фазе восстановления магнитной бури 7–8.09.2017 и связь их динамики с изменениями параметров межпланетной среды. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59, № 3. С. 301–315. DOI: [10.1134/S001679401903012X](https://doi.org/10.1134/S001679401903012X).

Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. *Несущая способность деталей машин*. М.: Машиностроение, 1975. 354 с.

Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegayaev V.V., et al. Magnetic storms and magnetotail currents. *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, iss. A4. P. 7737–7748. DOI: [10.1029/95JA03509](https://doi.org/10.1029/95JA03509).

Asikainen T., Maliniemi V., Mursula K. Modeling the contributions of ring, tail, and magnetopause currents to the corrected  $Dst$  index. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010. Vol. 115, iss. A12. DOI: [10.1029/2010JA015774](https://doi.org/10.1029/2010JA015774).

Borovsky J.E., Thomsen M.F., Elphic R.C., et al. The transport of plasma sheet material from the distant tail to geosynchronous orbit. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, iss. A9. P. 20297–20331. DOI: [10.1029/97JA03144](https://doi.org/10.1029/97JA03144).

Cai D.S., Tao W., Yan X., et al. Bifurcation and hysteresis of the magnetospheric structure with a varying southward IMF: Field topology and global three-dimensional full particle simulations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2009. Vol. 114, iss. A12210. DOI: [10.1029/2007JA012863](https://doi.org/10.1029/2007JA012863).

Dorman L.I., Dorman I.V., Lucci N., et al. Hysteresis between solar activity and cosmic rays during cycle 22: The role of drifts, and the modulation region. *Adv. Space Res.* 2001. Vol. 27, no. 3. P. 589–594. DOI: [10.1016/S0273-1177\(01\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00089-8).

Ganushkina N.Y., Liemohn M.W., Dubyagin S. Current systems in the Earth's magnetosphere. *Rev. Geophys.* 2018. Vol. 56. P. 309–332. DOI: [10.1002/2017RG000590](https://doi.org/10.1002/2017RG000590).

Gosling J.T. The solar flare myth. *JGR. Space Phys.* 1993. Vol. 98, iss. A11. P. 18937–18949. DOI: [10.1029/93JA01896](https://doi.org/10.1029/93JA01896).

Hajra R., Tsurutani B.T., Lakhina G.S. The complex space weather events of 2017 September. *Astrophys. J.* 2020. Vol. 899, no. 1. DOI: [10.3847/1538-4357/aba2c5](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aba2c5).

Kane R.P. Lags, hysteresis, and double peaks between cosmic rays and solar activity. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, iss. A10. P. 1379. DOI: [10.1029/2003JA009995](https://doi.org/10.1029/2003JA009995).

Kilpua E.K.J., Balogh A., von Steiger R., Liu Y.D. Geoeffective properties of solar transients and stream interaction regions. *Space Sci. Rev.* 2017. Vol. 212. P. 1271–1314. DOI: [10.1007/s11214-017-0411-3](https://doi.org/10.1007/s11214-017-0411-3).

Kovalev I.I., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. A proposal to extend the spectrographic global survey method. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2022. Vol. 235. P. 105887. DOI: [10.1016/j.jastp.2022.105887](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105887).

Kozyra J.U., Liemohn M.W. Ring current energy input and decay. *Space Sci. Rev.* 2003. Vol. 109 (1-4). P. 105–131. DOI: [10.1023/B:SPAC.0000007516.10433.ad](https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000007516.10433.ad).

Mavromichalaki H., Belehaki A., Rafios X. Simulated effects at neutron monitor energies: evidence for a 22-year cosmic ray variation. *Astron. Astrophys.* 1998. Vol. 330. P. 764–772.

McCracken K.G., Rao U.R., Shea M.A. The Trajectories of Cosmic Rays in a High Degree Simulation of the Geomagnetic Field. *MIT Tech. Rep. Massachusetts Institute of Technology. Laboratory for Nuclear Science*. Cambridge. 1962. 146 p.

Ptitsyna N.G., Danilova O.A., Tyasto M.I., et al. Cosmic ray cutoff rigidity governing by solar wind and magnetosphere parameters during the 2017 Sep 6–9 solar-terrestrial event. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2023. Vol. 246. P. 106067. DOI: [10.1016/j.jastp.2023.106067](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106067).

Richardson I.G., Cane H.V. Geoeffectiveness ( $Dst$  and  $K_p$ ) of interplanetary coronal mass ejections during 1995–2009 and implications for storm forecasting. *Space Weather*. 2011. Vol. 9, no. 7. DOI: [10.1029/2011sw000670](https://doi.org/10.1029/2011sw000670).

Scolini C., Chane E., Temmer M., et al. CME-CME Interactions as sources of CME geoeffectiveness: the formation of the complex ejecta and intense geomagnetic storm in 2017 early September. *Astrophys. J. Supplement Ser.* 2020. Vol. 247 (1). DOI: [10.3847/1538-4365/ab6216](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6216).

Shen C., Xu M., Wang Y., et al. Why the shock-ICME complex structure is important: learning from the early 2017 September CMEs. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 861, no. 1. P. 861–960. DOI: [10.3847/1538-4357/aac204](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac204).

Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure. *J. Geophys. Res.* 2002a. Vol. 107, no. A8. P. 1179. DOI: [10.1029/2001JA000219](https://doi.org/10.1029/2001JA000219).



Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parametrization and fitting to observation. *J. Geophys. Res.* 2002b. Vol. 107, no. A8. P. 1176. DOI: [10.1029/2001JA000220](https://doi.org/10.1029/2001JA000220).

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, no. A5. P. 1209. DOI: [10.1029/2002JA009808](https://doi.org/10.1029/2002JA009808).

*Статья подготовлена по материалам девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.*

*Как цитировать эту статью:*

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Сдобнов В.Е. Явления гистерезиса в отклике геомагнитной активности и параметров космических лучей на вариации межпланетной среды во время магнитной бури. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 3. С. 70–78. DOI: [10.12737/szf-103202408](https://doi.org/10.12737/szf-103202408).