

УДК 523–62,523.9

ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА В ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ СУПЕРБУРИ 7–8 НОЯБРЯ 2004 г.

© 2021 г. Н. Г. Птицына^{1, *}, О. А. Данилова^{1, **}, М. И. Тясто¹

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПб ИЗМИРАН), г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: nataliaptitsyna@ya.ru

**e-mail: md1555@mail.ru

Поступила в редакцию 21.11.2020 г.

После доработки 11.01.2021 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Способность космических лучей проникать внутрь магнитосферы характеризуется жесткостью геомагнитного обрезания R , т.е. жесткостью, ниже которой поток частиц обрезан из-за магнитного экранирования. Во время магнитной бури топология магнитного поля изменяется, что влечет за собой вариации жесткости обрезания ΔR . В статье рассмотрена зависимость $\Delta R_{\text{эф}}$ (вычисленных с помощью прослеживания траекторий частиц космических лучей в модельном магнитосферном поле) от параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и магнитосферы на разных фазах сильной магнитной бури 7–8 ноября 2004 г. Найдено, что траектория $\Delta R_{\text{эф}}$, т.е. последовательные значения, которые принимает $\Delta R_{\text{эф}}$ в зависимости от исследуемых параметров, во время главной фазы не совпадает с траекторией в восстановительной фазе – формируются петли гистерезиса. Для связи $\Delta R_{\text{эф}}$ с геомагнитным индексом Dst и скоростью солнечного ветра получены узкие петли гистерезиса, а с электромагнитными параметрами – широкие. Форма петлей гистерезиса обнаруживает зависимость от широты наблюдения: с увеличением широты площадь петлей для всех исследуемых параметров увеличивается.

DOI: 10.31857/S0016794021040131

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитная жесткость R (момент на единицу заряда) характеризует способность космических лучей (КЛ) проникать внутрь магнитосферы. Жесткость геомагнитного обрезания или геомагнитный порог – это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из-за магнитного экранирования. Во время магнитной бури геомагнитное экранирование уменьшается из-за уменьшения поля внутри магнитосферы как следствия формирования токовых систем – кольцевого тока, токов магнитопаузы и хвоста магнитосферы, а также продольных высокоширотных токов. В процессе эволюции бури топология магнитного поля изменяется, что влечет за собой изменение жесткости магнитного обрезания.

В многочисленных работах получено, что вариации геомагнитных порогов ΔR зависят от геомагнитной активности, параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля ММП [Kanekal et al., 1998; Belov et al., 2003; Shimazu, 2009; Kress et al., 2010; Тясто и др., 2011; Tyssøy and Stadsnes, 2014; Adriani et al., 2016; Данилова и др., 2019; Птицына и др., 2019]. Однако результаты ис-

следования зависимости ΔR от межпланетных параметров и индексов геомагнитной активности очень противоречивы: полученные зависимости различны для разных бурь и используемых подходов. Частично 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. Контроль ΔR параметрами гелио- и геомагнитосферы на разных фазах возмущения плохо изучен. Можно указать лишь несколько детальных исследований в этой области. Так, в работе [Adriani et al., 2016] найдены соответствующие коэффициенты корреляции для разных фаз умеренной бури 14 декабря 2006 г., а в работе [Птицына и др., 2020; Птицына и др., 2021] – для сильных бурь 20 ноября 2003 г. и 7–8 ноября 2004 г. В этих работах найдено, что взаимосвязь ΔR и параметров гелио- и геомагнитосферы различна на разных этапах эволюции магнитной бури, что приводит иногда к достаточно неожиданным суммарным эффектам на масштабе всей бури.

В работе [Птицына и др., 2021] было найдено, что на разных фазах бури наблюдается не только разная зависимость ΔR от варьируемого аргумента – параметров геомагнитной активности, СВ и параметров межпланетного магнитного поля (ММП), – но и от направления изменения аргумента. Траектории изменения жесткостей обрезания в зависимости от исследуемых параметров во время интенсификации бури (развитие токовых систем) не совпадали с траекториями на восстановительной фазе (распад токовых систем), что является признаком гистерезиса. В работе [Птицына и др., 2021] эти не отмеченные ранее явления гистерезиса были обнаружены для одной бури (в ноябре 2003 г.) и только для одной станции (Москва). Поэтому наличие этого эффекта для других магнитных возмущений, и для других станций (других широт) оставалось под вопросом.

Целями данной работы было: (i) проследить динамику изменений геомагнитных порогов ΔR в зависимости от динамики параметров межпланетной среды и геомагнитосферы во время эволюции магнитной бури 7–8 ноября 2004 г. для всех трех фаз бури; (ii) попытаться выявить явления гистерезиса, их характерные особенности, а также их пространственные зависимости, в частности, зависимости от широты.

2. МЕТОДЫ

Эффективные жесткости геомагнитного обрезания $R_{эф}$ были рассчитаны методом прослеживания траекторий частиц КЛ в модельном магнитном поле [McCracken et al., 1962; Shea et al., 1965]. В качестве модели была использована магнитосферная модель T_s01 [Tsyganenko, 2002; Tsyganenko et al., 2003]. В этой модели основными источниками магнитного поля магнитосферы являются: симметричный и частичный круговые токи, система токов хвоста магнитосферы, продольные токи Биркеланда регионов 1 и 2, токи на магнитопаузе. В качестве входных параметров, определяющих влияние межпланетных условий на магнитосферу, используются *Dst*-вариация, плотность и скорость СВ, а также компоненты ММП.

Вариации жесткостей обрезания $\Delta R_{эф}$, полученные этим методом, определялись как разности между значениями жесткостей, рассчитанными для каждого часа в период бури, и жесткостями в спокойный период перед бурей. За спокойные ($Dst \approx 0$) были взяты среднесуточные значения R 5 ноября 2004 года.

Коэффициенты корреляции k между $\Delta R_{эф}$ и исследуемыми параметрами вычислялись для следующих 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). Станции

выбирались на разных широтах таким образом, чтобы они в спокойное время охватывали большую полосу жесткостей обрезания R : Токио – 11.0 ГВ, Алматы – 6.18 ГВ, Рим – 6.1 ГВ, Иркутск – 3.25 ГВ, Москва – 2.12 ГВ, Хобарт – 1.76 ГВ.

Коэффициенты k и стандартные ошибки s были получены из анализа регрессионных уравнений отдельно по выборкам наблюдений для периодов каждой из трех фаз – предварительной, главной и восстановительной [Птицына и др., 2020].

3. ДАННЫЕ

Следующие данные использовались в качестве исходных: полное магнитное поле B , его компоненты B_z и B_y , электрическая компонента E_y , плотность N , скорость V , и давление P СВ, индексы K_p и Dst геомагнитной активности. Эти данные взяты на сайте (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

В работе были использованы вариации жесткости обрезания $\Delta R_{эф}$ и коэффициенты корреляции k с исследуемыми параметрами, полученные нами ранее в работе [Птицына и др., 2020]. Дополнительно были посчитаны k для корреляции $\Delta R_{эф}$ и E_y компоненты электрического поля на всех трех фазах бури.

На рисунке 1 для 7–8 ноября 2004 г. на двух верхних панелях представлены значения $\Delta R_{эф}$ для станций Токио (а) и Москва (б); на остальных панелях (сверху вниз) приведены изменения во времени B , B_z , B_y , E_y , N , P , K_p и Dst и V . Исходя из особенностей поведения во времени этих параметров, период магнитной бури 7–8 ноября 2004 г. был разбит на три фазы следующим образом: предварительная фаза бури, т.е. период перед бурей с 03:00 UT по 19:00 UT 7 ноября, главная фаза с 20:00 UT 7 ноября по 06:00 UT 8 ноября, фаза восстановления с 07:00 UT по 24:00 UT 8 ноября [Птицына и др., 2020].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Признаки гистерезиса

На рисунке 2 приведены диаграммы рассеяния между $\Delta R_{эф}$ и Dst , V , B_z и B для ст. Москва на всех фазах бури. На этом рисунке точки для предварительной фазы бури показаны квадратиками, для главной – кружками, для восстановительной – треугольниками. На каждой панели рис. 2 приведены также коэффициенты корреляции k_1 , k_2 и k_3 для каждой из трех фаз бури между $\Delta R_{эф}$ и исследуемыми параметрами. Кроме того, приведен линейный тренд для каждой фазы в виде прямых линий.

Рассмотрим рис. 2а, на котором показана связь между $\Delta R_{эф}$ и B_z . Из рисунка видно, что B_z

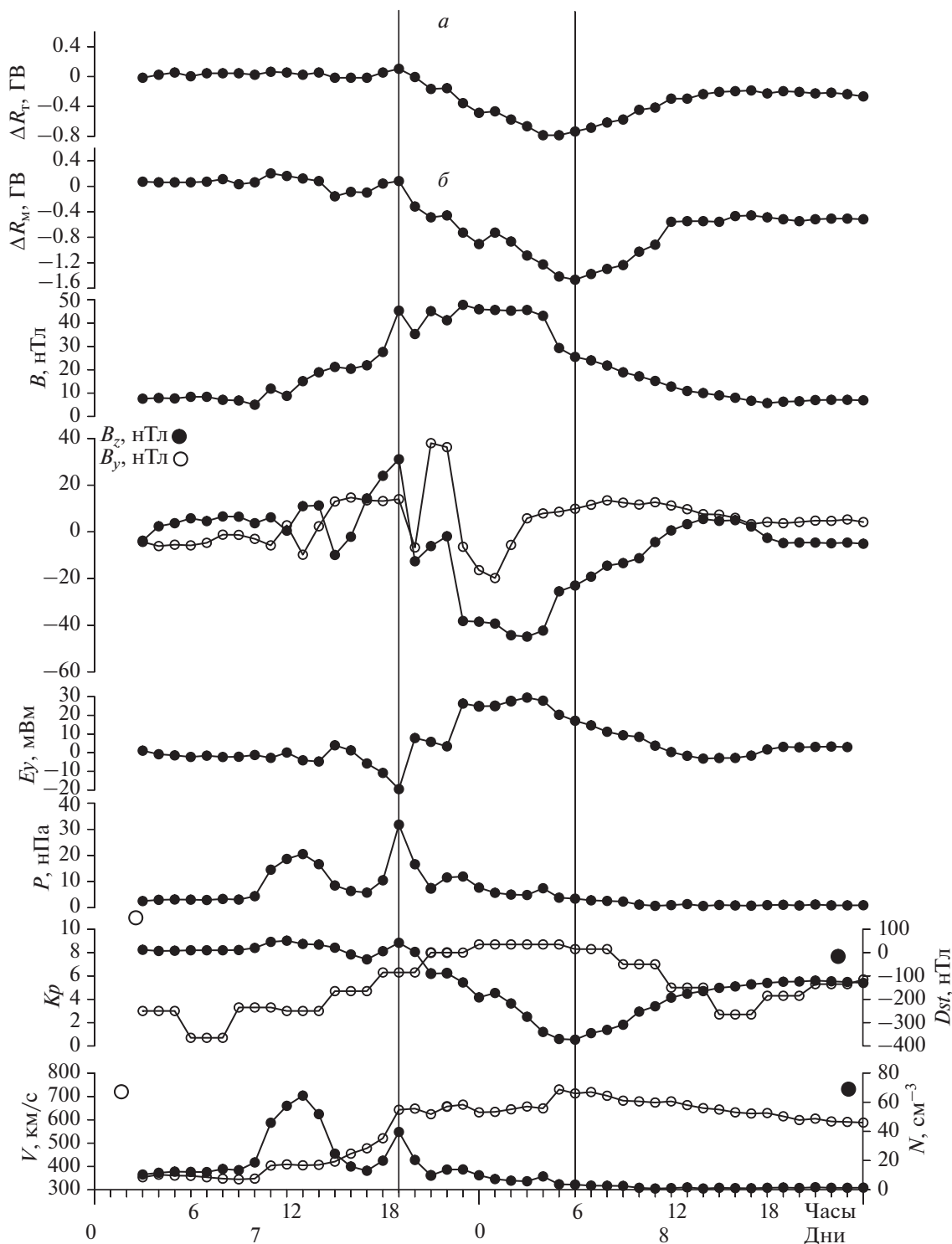


Рис. 1. Межпланетные параметры и индексы геомагнитной активности 7–8 ноября 2004 г. На верхней панели (сверху вниз) показаны изменения жесткостей обрезания $\Delta R_{эф}$ для станций Токио (а) и Москва (б), полное магнитное поле B , его компоненты B_z и B_y , электрическая компонента E_y , давление P СВ, индексы K_p и Dst , плотность N , скорость V СВ. Вертикальными линиями отмечена главная фаза бури.

практически во время всей предварительной фазы было положительным и практически не влияло ($k_1 = 0.24$) на поведение геомагнитного обрезания,

так что $\Delta R_{эф}$ оставалось вблизи нуля. Затем B_z сменило знак на отрицательный (7 ноября в 20:00 UT), определяя главную фазу, и после этого

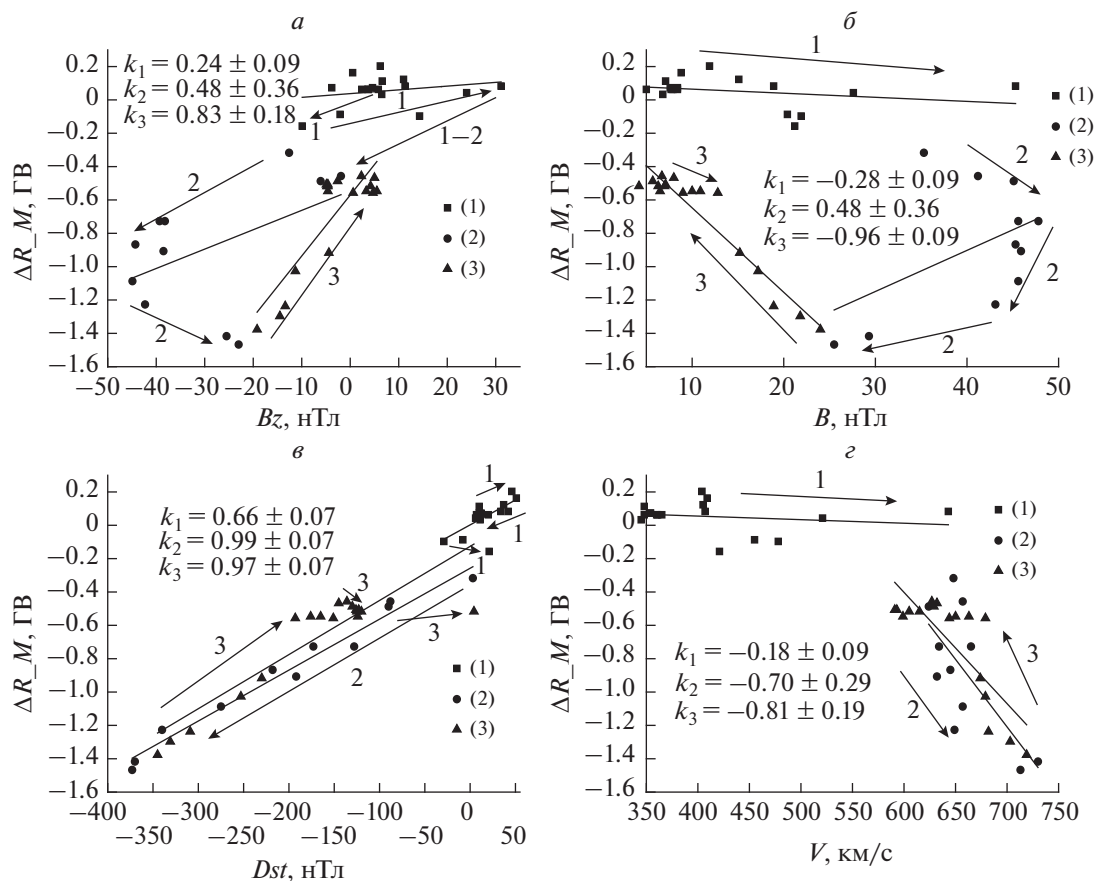


Рис. 2. Диаграмма взаимосвязи $\Delta R_{эф}$ с параметрами СВ, ММП и геомагнитной активности на ст. Москва для трех фаз бури 7–8 ноября 2004 г.: (1) – предварительная, (2) – главная, (3) – восстановительная. Стрелками указано направление течения времени при развитии бури. Коэффициенты корреляции k для трех фаз и линейные тренды также показаны.

началось падение $R_{эф}$, которое продолжалось до 06:00 UT. После достижения максимума (-44.9 нТл) $|B_z|$ начало уменьшаться и к концу главной фазы в 06:00 UT составило -23 нТл. При этом в течение всей главной фазы наблюдалось значительное падение $R_{эф}$, которое составило $\Delta R_{эф} = -1.5$ ГВ к концу фазы. Затем началось восстановление параметров. Линейные тренды точек сходятся к началу главной и концу восстановительной фаз. Видно, что траектория изменения значений $\Delta R_{эф}$ (B_z) на восстановительной фазе не совпадает с траекториями на предварительной и главной фазах. Полученная зависимость $\Delta R_{эф}$ (B_z) неоднозначна, она имеет петлеобразную форму: одно и то же значение $\Delta R_{эф}$ получается при различных значениях B_z . Таким образом, рис. 2 позволяет проследить зависимость $\Delta R_{эф}$ не только от значения варьируемого аргумента B_z , но и от направления изменения аргумента. Зависимость от направления изменения аргумента является признаком гистерезиса, т.е. в итоге, траектория изменения значений $\Delta R_{эф}$ (B_z) формирует гисте-

резисную петлю. Эта петля является широкой, что иллюстрируется видом линейных трендов. Обратим внимание на то обстоятельство, что в данном случае коэффициенты корреляции для главной и восстановительной фаз существенно различаются: $k_2 = 0.48 \pm 0.36$ и $k_3 = 0.83 \pm 0.18$.

Рисунок 2а демонстрирует, что точки на диаграмме $\Delta R_{эф} - B_z$ формируют кривую, свидетельствующую о нелинейности связи этих двух переменных. Из рисунка 2а видно, что во время главной фазы B_z меняется в пределах от -1.9 до -44.9 нТл в течение времени от 20:00 UT 7 ноября до 04:00 UT 8 ноября. В это время $|\Delta R_{эф}|$ растет в прямой корреляции с ростом $|B_z|$, после чего с 04:00 UT $|B_z|$ начинает уменьшаться, а $|\Delta R_{эф}|$ продолжает расти вплоть до достижения минимального значения $\Delta R = -1.5$ ГВ в максимуме бури.

Именно этим специфическим нелинейным поведением связи $\Delta R_{эф} - B_z$ можно объяснить меньшую корреляцию между $\Delta R_{эф}$ и B_z в главной фазе бури, чем в восстановительной.

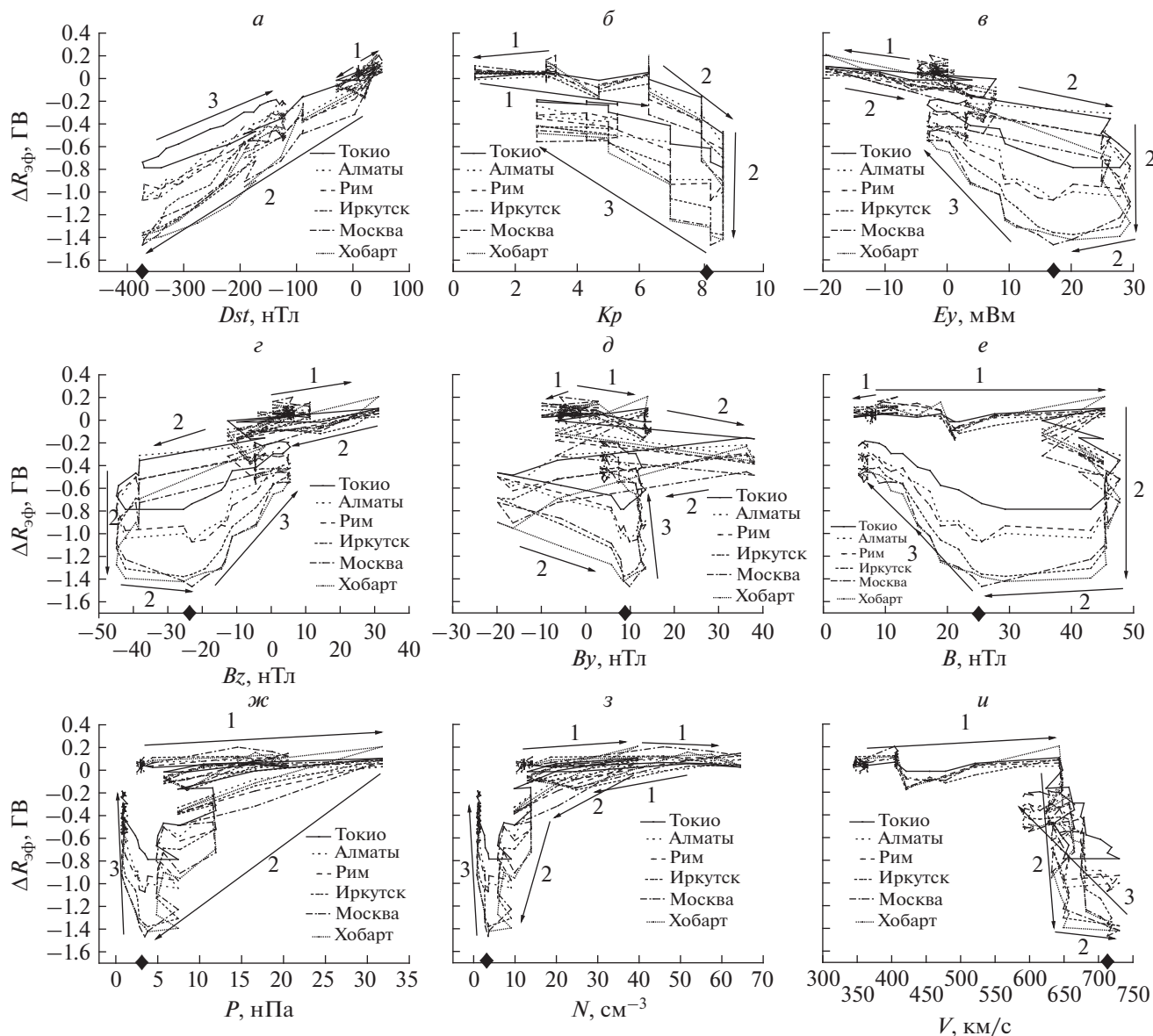


Рис. 3. Петли гистерезиса для взаимосвязи $\Delta R_{эф}$ с параметрами геомагнитной активности, ММП и СВ на разноширотных станциях. Три фазы бури: (1) – предварительная, (2) – главная, (3) – восстановительная. Стрелками указано направление течения времени при развитии бури. Черный ромбик на оси абсцисс указывает момент максимума бури, который совпадает с концом главной фазы.

Такого же типа нелинейная взаимосвязь прослеживается между $\Delta R_{эф}$ и общим магнитным полем B . Для связи $\Delta R_{эф} - B$ петля гистерезиса демонстрирует, что в 04 UT 8 ноября наблюдается изменение прямой пропорциональной зависимости на обратную. В этом случае, так же как и для Bz коэффициент корреляции в восстановительной фазе ($k_3 = -0.96 \pm 0.09$) по абсолютной величине существенно превышает коэффициент корреляции в главной фазе ($k_2 = 0.48 \pm 0.36$). Такая же петля гистерезиса образуется и для E_y (не показана на рис. 2, но видна на рис. 3*в*). То есть вза-

имосвязь $\Delta R_{эф}$ со всеми электромагнитными параметрами формирует широкую однотипную петлю гистерезиса, которая указывает на резкое изменение режима взаимодействия с прямой пропорциональности на обратную в 04:00 UT 8 ноября.

Основная разница между образуемыми петлями на рис. 2*а* и 2*б* заключается в том, что для Bz изменения $\Delta R_{эф}$ (Bz) происходят против часовой стрелки, а изменения $\Delta R_{эф}$ (B) – по часовой стрелке. Для петли гистерезиса “по часовой стрелке” при фиксированном значении ΔR значе-

ние аргумента на главной фазе больше, чем на восстановительной. Для петли гистерезиса “против часовой стрелки” величина аргумента на главной фазе меньше, чем на восстановительной.

На рисунке 2*в* показана зависимость изменений $\Delta R_{эф}$ от геомагнитного индекса Dst . Видно, что корреляция этих параметров на всех фазах бури очень высока, будучи максимальной в главной ($k_2 = 0.99 \pm 0.07$) и восстановительной фазах ($k_3 = 0.97 \pm 0.07$). Видно, что в главной фазе по мере развития бури (развитие кольцевого тока) с уменьшением Dst до -373 нТл происходит падение $\Delta R_{эф}$ до минимального значения -1.5 ГВ. Т.е. максимальное падение жесткости обрезания наблюдается в максимуме бури. На фазе восстановления (распад кольцевого тока) с увеличением Dst , падение $\Delta R_{эф}$ уменьшается. Видно, что точки главной фазы лежат близко к точкам восстановительной фазы, иногда перекрывая их. Однако траектории изменения значений $\Delta R_{эф}$ (Dst) в главной и восстановительной фазах не совпадают, что можно видеть и при сравнении линейных трендов. Отсюда можно сделать вывод о том, что взаимосвязь $\Delta R_{эф}$ и Dst обнаруживает признаки гистерезиса с характерной узкой петлей гистерезиса.

На рисунке 2*г* показана зависимость изменений $\Delta R_{эф}$ от скорости СВ V . Видно, что падение $\Delta R_{эф}$ происходит в прямой пропорциональности с ростом V : $\Delta R_{эф}$ достигает минимума для этой бури (-1.5 ГВ) при росте V от 650 км/с в начале главной фазы до 750 км/с в конце. Здесь так же, как и для Dst , точки главной фазы расположены очень близко к точкам восстановительной фазы, в связи с чем траектории $\Delta R_{эф}$ (V), так же как линейные тренды, лежат очень близко друг к другу, однако они не совпадают, формируя узкую петлю гистерезиса. Коэффициенты корреляции для главной и восстановительной фазы достаточно высоки и близки друг к другу ($k_2 = -0.70 \pm 0.29$, $k_3 = -0.81 \pm 0.19$).

4.2. Зависимость петли гистерезиса от всех параметров и широты

В этом параграфе рассмотрим петли гистерезиса в зависимости от всех исследуемых параметров, а также от широты. Для этого на рис. 3 приведены диаграммы зависимости $\Delta R_{эф}$ от Dst , Kp , Ey , Bz , Vy , B , V , N и P , где точки ΔR соединены во временной последовательности. Кроме того, диаграммы построены для всех шести разноширотных станций, данные которых взяты для исследования.

На рисунке 3 видно, что зависимость $\Delta R_{эф}$ от параметров СВ и магнитосферы формирует петли гистерезиса для всех исследуемых параметров. Видно, что для Kp , B , Bz , Ey , N , и P петля гистерезиса

достаточно широкая. Для Dst и V петли гистерезиса узкие (сравним с рис. 2). При этом зависимость $\Delta R_{эф}$ от V носит не столь регулярный характер, как для остальных параметров, траектории восходящей и нисходящей ветви гистерезиса в некоторых местах пересекают друг друга. Менее регулярная картина видна также и для Vy . Тем не менее, полученные в результате кривые для V и Vy сохраняют отчетливые признаки гистерезиса.

Видно, что для петли гистерезиса на всех диаграммах рис. 3, кроме Bz и V (рис. 3*з*, 3*и*) обход цикла проходит по часовой стрелке. Что касается гистерезиса для Vy , то ситуация здесь более сложная – обход цикла на главной фазе начинается по часовой стрелке, а вторая половина главной фазы (с 04:00 UT) обходится против часовой стрелки, описывая s-образную кривую.

Обращает на себя внимание подобие петель гистерезиса для зависимости $\Delta R_{эф}$ от Bz и Ey (рис. 3*в* и 3*г*), которые представляют собой очень похожие зеркально отраженные фигуры. Этот факт объясняется связью $Ey = -VBz$ [Dungey, 1961].

Подобие петель гистерезиса видно также и на рис. 3*ж* и 3*з*. Это гистерезис, образованный связью $\Delta R_{эф}$ с динамическими параметрами СВ N и P , которые также тесно связаны между собой. На этих рисунках видно, что в фазе восстановления идет резкое уменьшение падения $\Delta R_{эф}$, но при этом значения N и P практически не меняются, оставаясь около 0, которого они достигли вблизи максимума бури (рис. 1). Таким образом, плотность и давление СВ практически не участвуют в восстановительных процессах жесткости обрезания на восстановительной фазе бури.

На рисунке 3 видно, что верхняя часть каждой панели, та, которая соответствует подготовительной фазе бури, практически не изменяется с изменением широты. На этой фазе бури $\Delta R_{эф}$ колеблется около 0, тем самым показывая, что исследуемые параметры, сами изменяясь в широких пределах, практически не влияют на жесткость обрезания. Причем это происходит на всех широтах и для всех параметров. С началом бури геометрия петель гистерезиса резко меняется, они начинают растягиваться в сторону увеличения широты наблюдений. Рисунок 3 демонстрирует тот факт, что петли гистерезиса группируются по признаку широты. В самой верхней точке диаграммы расположена петля гистерезиса для наиболее низкоширотной ст. Токио, затем две петли для среднеширотных станций Алмата и Рим, и ниже – петли для высокоширотных станций Москва, Иркутск и Хобарт. Таким образом, падение $\Delta R_{эф}$ (увеличение $|\Delta R_{эф}|$) увеличивается пропорционально увеличению широты. Однако самое большое падение $\Delta R_{эф}$ наблюдается практически на всех панелях не для самой высокоширотной ст. Хобарт, а для Москвы и Иркутска. Та-

кая же зависимость ΔR от широты видна на рис. 1: амплитуда $\Delta R_{эф}$ на низкоширотной ст. Токио меньше, чем на высокоширотной ст. Москва. То есть смещение петли гистерезиса по оси ординат к нижней точке происходит пропорционально увеличению широты. При этом не имеет значения для какого параметра СВ и магнитосферы сформирована петля, эта тенденция наблюдается на всех панелях рис. 3.

Для связи $\Delta R_{эф}-Bz$, $\Delta R_{эф}-Bu$ и $\Delta R_{эф}-V$ цикл гистерезиса обходится против часовой стрелки. Это означает, что значения Bz , Bu и V на главной фазе по абсолютной величине меньше, чем на восстановительной. Для остальных параметров цикл гистерезиса обходится по часовой стрелке.

4.3. Обсуждение результатов

В статье рассмотрена зависимость $\Delta R_{эф}$ от параметров СВ, ММП и магнитосферы на разных фазах сильной магнитной бури 7–8 ноября 2004 г. Найдено, что эта взаимосвязь зависит от характера изменения этих параметров: траектория изменения $\Delta R_{эф}$ в зависимости от исследуемых параметров во время развития токовых систем не совпадает с траекториями во время распада токовых систем. В процессе эволюции бури с развитием главной фазы и последующей восстановительной фазы исследуемые параметры гелио- и геомагнитосферы изменяются циклическим образом. В зависимости от их изменения в главной фазе происходит падение $\Delta R_{эф}$ до минимального значения -1.5 ГВ, а в восстановительной фазе происходит его восстановление до значений, лежащих около 0. Причем возвращение к предбуревому состоянию проходит по другой траектории, чем рост во время главной фазы. Это является признаком гистерезиса. Мы выяснили также, что форма петель гистерезиса обнаруживает зависимость от широты: с увеличением широты петля растягивается на диаграмме вдоль оси ординат. Причем эта зависимость прослеживается для связи $\Delta R_{эф}$ со всеми исследуемыми параметрами.

Явления гистерезиса во взаимосвязи изменений жесткостей обрезания КЛ и параметров гелио- и магнитосферы были получены в недавней работе [Птицына и др., 2021] для очень сильной бури 2003 г. на примере станции Москва. Сравнение признаков гистерезиса для обеих бурь обнаруживает общие черты. В частности, отмечены узкие петли для связи $\Delta R_{эф}$ с геомагнитным индексом Dst и более широкие — с электромагнитными параметрами. Наиболее интересным фактом является подобие петель гистерезиса для южной компоненты поля Bz . В обоих случаях после начала бури значения $|Bz|$ и $|\Delta R_{эф}|$ увеличиваются в прямой пропорциональности друг от друга, но через 8 ч $|Bz|$ начинает уменьшаться, а $|\Delta R_{эф}|$ про-

должает увеличиваться до конца главной фазы, т.е. прямая пропорциональная зависимость между $|\Delta R_{эф}|$ и $|Bz|$ сменяется обратной (2а этой статьи и рис. 2г в статье [Птицына и др., 2021]). В работе [Птицына и др., 2021] было найдено, что во время бури 2003 г. описанное нелинейное развитие связи $\Delta R_{эф}$ с Bz происходило практически параллельно циклическому расширению—сужению области проникновения КЛ в магнитосферу, которое было установлено в работе [Ebihara et al., 2005] с помощью данных космических аппаратов DMSP, NOAA, и LANL. Было найдено, что проникновение частиц КЛ в магнитосферу в ноябре 2003 г. контролировалось продольными токами [Ebihara et al., 2005]. Аналогичное нелинейное поведение взаимосвязи $\Delta R_{эф}$ с Bz в главной фазе бури 2004 г. позволяет предположить, что специфика этой связи и в этом случае, вероятно, определялась продольными токами. Из этого анализа также видно, что существенные изменения жесткостей обрезания в ответ на изменения параметров магнитосферы могут происходить на временных шкалах меньших, чем фаза бури.

Область проникновения заряженных космических частиц в различные секторы магнитосферы во время бури в апреле 1979 г. была рассмотрена с одновременным использованием данных ИСЗ Космос–900, Космос–1067 и ИНТЕРКОСМОС в работе [Сосновец и Тверская, 1986]. Было найдено, что кривые положения границ проникновения протонов с энергией >1 МэВ в главной и восстановительной фазах отличаются, то есть обнаруживаются признаки гистерезиса. При этом ширина петли гистерезиса для вечернего сектора больше и составляет 5° . Авторы работы [Сосновец и Тверская, 1986] связывают этот факт с формированием ассиметричного кольцевого тока, во время которого происходит дополнительная инжекция высокоэнергичных частиц в вечернем секторе.

Изменение жесткости обрезания в зависимости от параметров СВ и ММП тесно связано с динамикой взаимодействия СВ и магнитосферы и с передачей энергии от СВ магнитосфере. Гистерезис в зависимости $\Delta R_{эф}$ от электромагнитных параметров, полученный нами, можно соотнести с результатами работы [Cai et al., 2009], в которой авторы рассмотрели 3D модель электромагнитных частиц, взаимодействующих с магнитосферой Земли, и исследовали стабильность такой системы. Авторы получили, что при циклическом изменении $|Bz|$ от 0 до максимального значения и обратно, при достижении $|Bz|$ некоторого критического значения магнитосфера резко сжимается и соответственно внезапно меняется топология магнитного поля, что идентифицируется как признак пересоединения на дневной стороне. Получено, что при таком циклическом измене-

нии B_z в какой-то момент времени система переходит из стабильного в нестабильное состояние, при этом происходит переход магнитного поля к форме с уменьшенной симметрией, в которой возникают диссипативные процессы, позволяющие поглощать излишек энергии, поступающей из СВ. По мнению авторов [Cai et al., 2009] это означает, что при передаче энергии СВ магнитосфере через диссипативные процессы некоторая часть этой энергии не восстанавливается. Размер магнитосферы и вся топология магнитного поля в процессе восстановительной фазы бури возвращаются к первоначальному состоянию, однако следуя другим путем, формируя тем самым петлю гистерезиса.

Можно заключить, что полученный нами 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. Так как ширина петли гистерезиса определяется степенью симметрии/асимметрии процесса [Атабеков, 1957; Серенсен и др., 1975], то при взаимодействии КЛ с геомагнитным полем, а также с магнитными и динамическими параметрами межпланетной среды формируются петли гистерезиса разной ширины. Следует отметить, что площадь петли пропорциональна количеству энергии, которая теряется (переходит в тепло через диссипативные процессы) в ходе цикла гистерезиса [Красносельский и Покровский, 1983]. Таким образом, тот факт, что петля гистерезиса растягивается при переходе к более высоким широтам, т.е. ее площадь становится больше, свидетельствует, о том, что здесь действуют дополнительные диссипативные процессы, связанные с высокоширотными токовыми системами. Экспериментальные данные [Ермолаев и др., 2014] указывают на то, что буря 7–8 ноября 2004 г. характеризовалась чрезвычайно сильной геомагнитной активностью в авроральных и полярных широтах (более 2000 нТл согласно индексу AL). Существенное влияние высокоширотных токов на динамику очень сильных магнитных бурь во время главной и восстановительной фаз было продемонстрировано в работе [Левитин и др., 2014].

Эволюция токовых систем во время эволюции магнитной бури контролирует взаимодействие СВ и магнитосферы и, соответственно, определяет взаимосвязь жесткости обрезания КЛ и параметров магнитосферы, что отражается в характеристиках сформированных петель гистерезиса. Наши результаты свидетельствуют о том, что параметры гистерезиса действительно отражают изменения, происходящие в $\Delta R_{эф}$ и параметрах

гелио- и геомагнитосферы. Геометрия петли гистерезиса, ее вид, форма и/или площадь, по-видимому, могли бы служить информативным индексом взаимосвязи $\Delta R_{эф}$ и параметров гелио- и геомагнитосферы. Однако вопрос о возникновении гистерезиса при взаимодействии КЛ и магнитосферы во время бури, связанного с развитием и эволюцией токовых систем, к настоящему времени не разработан. Для выяснения физической сути явлений, определяющих возникающий гистерезис и его характеристики, необходимо наличие гораздо большего статистического материала, чем дает исследование двух бурь. Мы предполагаем заняться накоплением и анализом такого материала в ближайшем будущем.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали зависимость изменения жесткостей геомагнитного обрезания $\Delta R_{эф}$ от параметров СВ, ММП и магнитосферы в процессе развития сильной магнитной бури 7–8 ноября 2004 г.

Получено, что $\Delta R_{эф}$ зависит не только от варьируемого аргумента — параметров геомагнитной активности и межпланетной среды, но и от характера изменения аргумента. В процессе эволюции бури с развитием главной фазы и последующей восстановительной фазы исследуемые параметры гелио- и геомагнитосферы изменяются циклическим образом.

Установлено, что траектория $\Delta R_{эф}$, т.е. последовательные значения, которые принимает $\Delta R_{эф}$ в зависимости от исследуемых параметров, во время развития токовых систем в главной фазе не совпадает с траекторией во время распада токовых систем в восстановительной фазе — формируются петли гистерезиса.

Найдено, что для связи $\Delta R_{эф}$ с геомагнитными индексами и скоростью СВ V отмечены узкие петли, а с электромагнитными параметрами — широкие. Широта станции КЛ влияет на форму гистерезисной петли. Верхние точки на петле гистерезиса расположены практически одинаково для всех станций, в этих точках (перед бурей) $|\Delta R_{эф}| \approx 0$, а нижняя точка на петле гистерезиса (максимум бури в конце главной фазы) — это максимум $|\Delta R_{эф}|$, который увеличивается с увеличением широты, растягивая петлю. В максимуме бури на низких широтах (ст. Токио) наблюдается максимальное падение жесткости обрезания $\Delta R_{эф} \approx -0.8$ ГВ, а на высоких широтах (ст. Москва, Иркутск и Хобарт) $\Delta R_{эф}$ достигает -1.5 ГВ. Эти значения определяют размер/площадь петли гистерезиса для исследуемой станции. Площадь гистерезиса в свою очередь, вероятно, определяет ту часть энергии СВ, поступающей в магнитосферу,

которая теряется во время эволюции магнитной бури (интенсификация-релаксация).

Наши результаты свидетельствуют о том, что характеристики сформированных петель гистерезиса отражают специфику взаимодействия СВ и магнитосферы в процессе эволюции токовых систем во время исследуемой магнитной бури. Можно предположить, что полученный нами 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, часть энергии не восстанавливалась. Другие токовые системы, которые развиваются и затухают на разных временных масштабах, также могли вносить асимметричный вклад в процесс эволюции бури.

Однако на данном этапе остается невыясненным, какая именно токовая система в общем случае стоит за полученными параметрами гистерезиса. Определение однозначных зависимостей $\Delta R_{\text{эф}}$ от конкретной токовой системы на каждом этапе бури является сложной нерешенной задачей, так как к настоящему времени взаимодействие солнечного ветра и магнитосферы, которое контролирует вариации $\Delta R_{\text{эф}}$, еще плохо понято. Для выяснения физической сути явлений, определяющих возникающий гистерезис и его характеристики, в первую очередь необходимо наличие гораздо большего статистического материала. Мы предполагаем заняться созданием архива данных о гистерезисе по разным бурям и анализом этого материала в следующих работах.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим коллектив OMNI за предоставленную возможность использовать базу данных, созданную в рамках проекта GSFC/SPDF OMNIWeb (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. СПб.: Лань, 592 с. 2009.
- Данилова О.А., Демина И.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И. Картирование жесткости обрезания космических лучей во время главной фазы магнитной бури 20 ноября 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. С. 160–167. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0016793219020051>
- Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др. Солнечные и гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 6. С. 324–332. 2014.
- Красносельский М.А., Покровский А.В. Системы с гистерезисом. М.: Наука, 271 с. 1983.
- Левитин А.Е., Дремухина Л.А., Громова Л.И., Птицына Н.Г. Генерация магнитного возмущения в период исторической магнитной бури в сентябре 1859 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 3. С. 324–332. 2014. <https://doi.org/10.7868/S0016794014030110>
- 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. Т. 59. № 5. С. 569–577. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0016793219050098>
- 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. Т. 60. № 3. С. 281–292. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020020145>
- 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. № 1. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010120>
- Тясто М.И., Данилова О.А., Сдобнов В.Е. Вариации жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в период магнитосферных возмущений в мае 2005 г.: связь с межпланетными параметрами // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 75. № 6. С. 857–859. 2011.
- Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность деталей машин. М.: Машиностроение, 354 с. 1975.
- Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Динамика кольцевого тока по данным о солнечных КЛ в магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. № 1. С. 107–114. 1986.
- Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevska G.N. et al. PAMELA's measurements of geomagnetic cutoff variations during the 14 December 2006 storm // Space weather. V. 14. № 3. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016SW001364>
- Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V., Pchelkin V., Plainaki C., Mariatos G. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. V. 110. A09S20. 2005. <https://doi.org/10.1029/2005JA011067>
- Cai D.S., Tao W., Yan X., Lembege B., Nishikawa K.I. 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 Physics. V. 114. № A12. 2009. <https://doi.org/10.1029/2007JA012863>
- Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones // Phys. Rev. Lett. V. 6. P. 47–48. 1961. 2009. <https://doi.org/10.1029/2007JA012863>
- Ebihara Y., Fok M.-C., Sazykin S., Thomsen M.F., Hairston M.R., Evans D.S., Rich F.J., Ejiri M. Ring current and the magnetosphere-ionosphere coupling during the superstorm of 20 November 2003 // J. Geophys. Res. 2005. <https://doi.org/10.1029/2004JA010924>
- Kanekal S., Baker D., Blake J., Klecker B., Cummings J., Mewaldt R., Mason G., Mazur J. High-latitude energetic particle boundaries and the polar cap: A statistical study // J. Geophys. Res. V. 103. P. 9367–9372. 1998.

- *Kress B.T., Mertens C.J., Wiltberger M.* Solar energetic particle cutoff variations during the 29–31 October 2003 geomagnetic storm // *Space Weather*. V. 8. S05001. 2010.
- *McCracken K.G., Rao U.R., Shea M.A.* The trajectories of cosmic rays in a high degree simulation of the geomagnetic field // *M.I.T. Tech. Rep. 77. Lab. Nucl. Sci. and Eng. Mass. Inst. of Technol. Cambridge*. 146 p. 1962.
- *Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G.* A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 70. P. 4117–4130. 1965.
- *Shimazu H.* Solar proton event and proton propagation in the earth's magnetosphere // *J. NICT*. V. 1. P. 191–199. 2009.
- *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // *J. Geophys. Res.* V. 107. A8. P. 1179. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JA000219>
- *Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C.* Storm–time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? // *J. Geophys. Res.* V. 108. A5. 1209. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009808>
- *Tysøy H.N., Stadsnes J.* Cutoff latitude variation during solar proton events: Causes and consequences // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. V. 120. P. 553–563. 2014.