

УДК 523-62523.9

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ С ЖЕСТКОСТЬЮ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ШИРОТЫ

© 2023 г. О. А. Данилова^{1, *}, Н. Г. Птицына¹, М. И. Тясто¹, В. Е. Сдобнов²¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

*md1555@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2022 г.

После доработки 07.05.2022 г.

Принята к публикации 01.09.2022 г.

Мы изучили особенности широтного поведения геомагнитных порогов космических лучей R , а также их чувствительности к параметрам межпланетной среды и магнитосферы во время трех фаз магнитной бури 7–8.IX.2017 – в начальной, главной и восстановительной фазах. Для этого R были рассчитаны двумя разными способами – методом спектрографической глобальной съемки ($R_{\text{сгс}}$) и методом прослеживания траекторий частиц космических лучей (КЛ) в модельном магнитном поле ($R_{\text{эф}}$). Максимальное понижение порогов наблюдается в максимуме бури ($Dst = -142$ нТл), достигая значений $\Delta R_{\text{сгс}} = -0.52$ ГВ и $\Delta R_{\text{эф}} = -0.66$ ГВ. Кривая вариаций $\Delta R_{\text{сгс}}$ в зависимости от жесткости обрезания станции наблюдения (широты) принимает классическую форму с максимумом падения порогов на среднеширотных станциях. Наиболее сильно ΔR коррелирует с Dst -индексом, что свидетельствует о том, что кольцевой ток играет главную роль в зависимости вариаций жесткостей обрезания КЛ. Также видно значительное влияние на $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ скорости солнечного ветра V и параметров межпланетного магнитного поля (ММП). На главной фазе $\Delta R_{\text{эф}}$ зависит от V и B_z ММП, а $\Delta R_{\text{сгс}}$ – от V и V_y . Для $\Delta R_{\text{сгс}}$ корреляция с электромагнитными параметрами изменяется в зависимости от станции наблюдения регулярным образом. Для $\Delta R_{\text{эф}}$ такой тенденции не наблюдается.

DOI: 10.31857/S0023420623010028, EDN: FHYHNE

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитная жесткость R (момент на единицу заряда) характеризует способность частиц космических лучей (КЛ) проникать в магнитосферу. Геомагнитный порог или жесткость геомагнитного обрезания (ЖГО) – это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из-за экранирования магнитного поля Земли [1, 2]. В результате геомагнитного обрезания возникают широтные эффекты. Взаимодействия магнитных и электрических полей солнечного ветра (СВ) с магнитосферными полями и токами приводит во время магнитных бурь к значительным изменениям порогов (ΔR).

Знание широтных зависимостей ΔR от параметров солнечного ветра и магнитосферы может прояснить некоторые черты взаимодействия системы “солнечный ветер – магнитосфера” и сопутствующие этому взаимодействию геомагнитные эффекты, которые управляют транспортировкой КЛ через магнитосферу и атмосферу во время возмущений. Кроме теоретического значе-

ния, это важно для обеспечения безопасности экипажа и пассажиров космических полетов, а также высокоширотной и высотной авиации [2–4]. Учет последствий плохой космической погоды становится еще более актуальным в свете современной тенденции развивать орбитальные скоростные межконтинентальные перелеты между любыми точками на Земле [5].

Долготные и широтные зависимости вариаций жесткостей обрезания в спокойные периоды и во время отдельных магнитных бурь рассматривались в ряде статей [1, 6–9]. Однако широтные зависимости чувствительности геомагнитных порогов к различным параметрам магнитосферы оставались за рамками этих исследований.

Энергию солнечного ветра в магнитосферу Земли во время магнитной бури передают выбросы корональной солнечной массы (СМЕ) или высокоскоростные коротирующие области возмущений (CIR) из корональных дыр. Поступление энергии, генерированной во время повышенной активности Солнца, и ее последующее затухание

в магнитосфере определяет различные этапы развития геомагнитной бури [10]. Целью данного исследования является определение геомагнитных порогов в период сильной геомагнитной бури 7–8.IX.2017, а также анализ зависимости их изменений от параметров межпланетной среды и геомагнитосферы при помощи расчета соответствующих корреляций. Особое внимание мы уделили анализу корреляций изменений геомагнитных порогов с межпланетными параметрами и индексами геомагнитной активности во время различных фаз развития анализируемой бури, имея в виду, что этот вопрос недостаточно изучен. При этом фокус данной работы был на широтных эффектах.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мы оценили связь вариаций жесткости геомагнитного обрезания ΔR с изменением параметров гелио- и геомагнитосферы в период времени 7–8.IX.2017. Для этого мы рассчитали ΔR двумя способами.

При использовании первого способа вертикальные эффективные геомагнитные пороги (или жесткости геомагнитного обрезания) $R_{\text{эф}}$ были получены методом численного интегрирования траекторий заряженных частиц в модельном магнитном поле Земли [11]. В качестве модели выбрана полуэмпирическая модель магнитосферы $Ts01$ [12, 13]. В $Ts01$ в качестве входных параметров используются данные о солнечном ветре и геомагнитной активности из базы данных OMNI (Geopack-2008, <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>). Вычисленные таким образом изменения геомагнитных порогов $\Delta R_{\text{эф}}$ далее называем *модельными*.

Второй способ определения ΔR был метод спектрографической глобальной съемки (СГС), при котором определение ЖГО ($R_{\text{сгс}}$) базируется на наблюдательных данных сети нейтронных мониторов [14]. Этот метод позволяет по наземным наблюдениям КЛ на мировой сети станций получать информацию о распределении первичных КЛ по энергиям и питч-углам в ММП, а также об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений. Вариации $\Delta R_{\text{сгс}}$ далее в статье называются *наблюдательными*.

Расчеты проводились для каждого часа в период 7–8.IX.2017 для станций, расположенных на разных широтах: обсерватория Emilio Segre в Израиле (ESOI) (33°.30 N, 35°.80 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

Кингстон (42°.99 S, 147°.29 E). Станции выбирались таким образом, чтобы в спокойное время они охватывали основную область пороговых жесткостей R_c , подверженных влиянию геомагнитного поля от ~ 11 ГВ (ESOI) до ~ 2 ГВ (Кингстон). Пороговые жесткости станций в спокойный период R_c рассчитывали, как среднее за спокойные сутки 6 ноября 2004 г. Затем вычислялись коэффициенты корреляции k вариаций жесткостей обрезания $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ с параметрами СВ, ММП и геомагнитной активности для перечисленных станций. Коэффициенты k получались из анализа регрессионных уравнений отдельно по выборкам наблюдений для каждой из трех фаз бури.

3. ДАННЫЕ

Данные о космических лучах для вычисления $R_{\text{сгс}}$ получены по результатам наблюдений, проведенных на оборудовании Центра коллективного пользования “Ангара” <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> и на уникальной научной установке “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)” <https://ckp-rf.ru/usu/433536/>.

Для вычисления $R_{\text{эф}}$ и корреляций использовались данные о часовых значениях параметров солнечного ветра (плотность N , скорость V , давление P), ММП (полное поле B , компоненты B_z и B_y), а также об азимутальной компоненте электрического поля E_y и индексах геомагнитной активности (Kp и Dst) из базы OMNI на сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Заметим, что данные OMNI не измеряются *in situ* около головной ударной волны каким-либо физически существующим космическим аппаратом (КА). Эти данные составлены из измерений ряда КА, находящихся в СВ около точки Лагранжа L1 (напр., *Wind*, *ACE*, *DSCOVR*). Эти измерения в СВ сдвигаются по времени от точки нахождения КА до головной ударной волны с учетом скорости конвекции СВ [15].

Данные о Dst поступают в базу OMNI из World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, а о Kp — из Helmholtz-Centre, Potsdam (GFZ, German Research Centre for Geosciences), где они рассчитываются по 13-ти станциям.

На рис. 1 показаны изменения параметров солнечного ветра, ММП и геомагнитной активности во время исследуемой магнитной бури с 11.00 UT 7.IX.2017 до 11.00 UT 8.IX.2017. Эта буря была связана с активной областью AR 12763, которая продемонстрировала в предыдущие дни очень высокий уровень вспышек и корональных

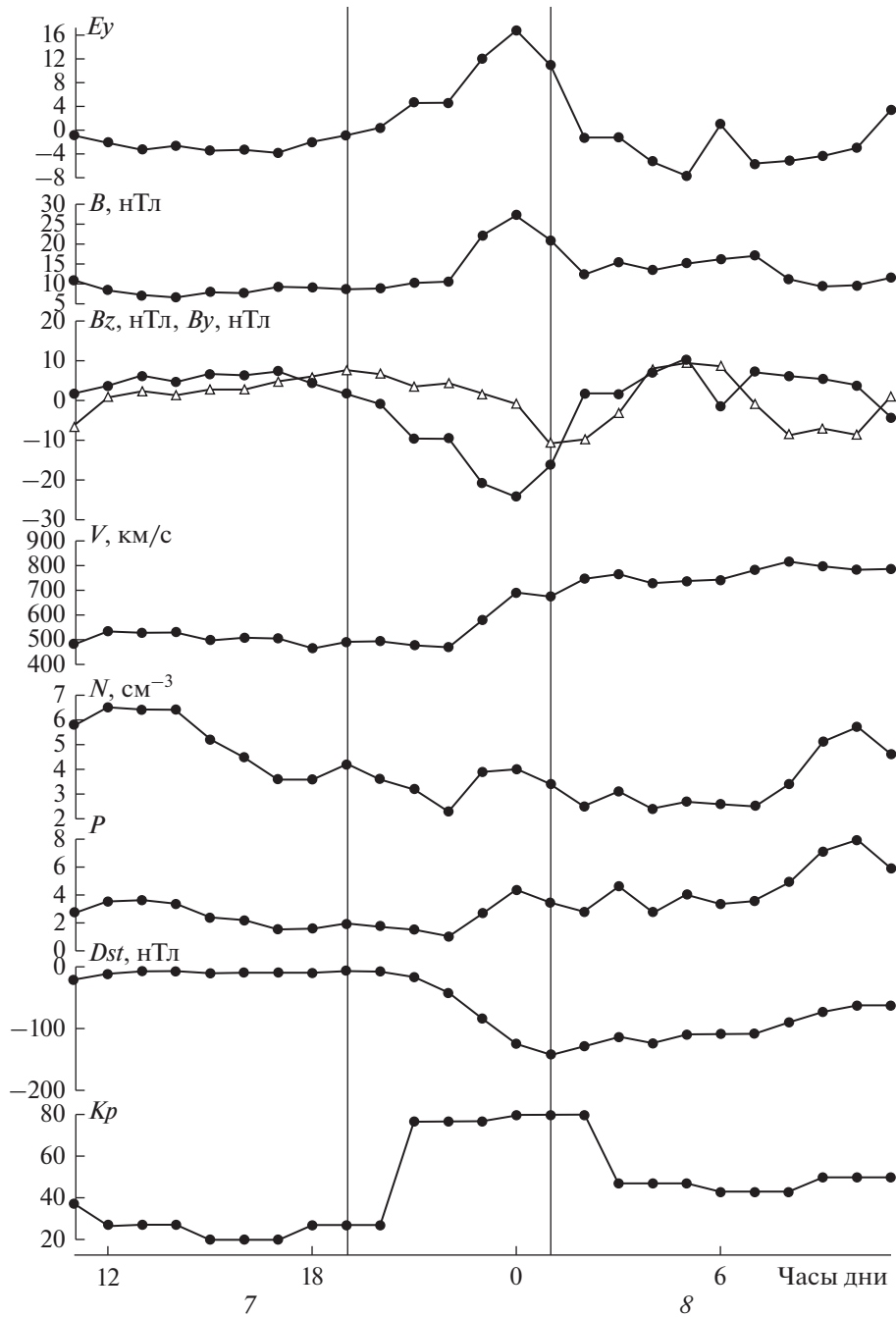


Рис. 1. Изменение параметров солнечного ветра и геомагнитного поля 7–8.IX.2017. Сверху вниз: E_y компонента электрического поля; компоненты ММП: B_z , B_y ; скорость V солнечного ветра; плотность N и динамическое давление P ; индексы геомагнитной активности Dst и Kp^*10 . Вертикальными линиями отмечена главная фаза бури.

выбросов массы (*CME*) [16]. Эти *CME*, связанные с ними ударные волны, магнитные “поршни” и магнитные облака были ответственны за два геомагнитных возмущения, наблюдавшиеся 7–9.IX.2017 [16, 17]. В частности, 7.IX.2017 около 20.00 UT, было зарегистрировано магнитное облако, которое и было ответственно за возникновение и развитие исследуемой бури 7–8.IX.2017

[16, 17]. В это время произошел поворот к югу B_z -компоненты, которая достигла $B_z = -24.2$ нТл в 0.00 UT. В 19.00 UT наблюдался небольшой скачок Dst , после которого началось понижение Dst до -142 нТл в 01.00 UT 8.IX.2017. Это определило главную фазу бури. После 01.00 UT началось восстановление Dst . Однако в 11.00 UT (максимальное $Dst = -63$ нТл) восстановление было прерва-

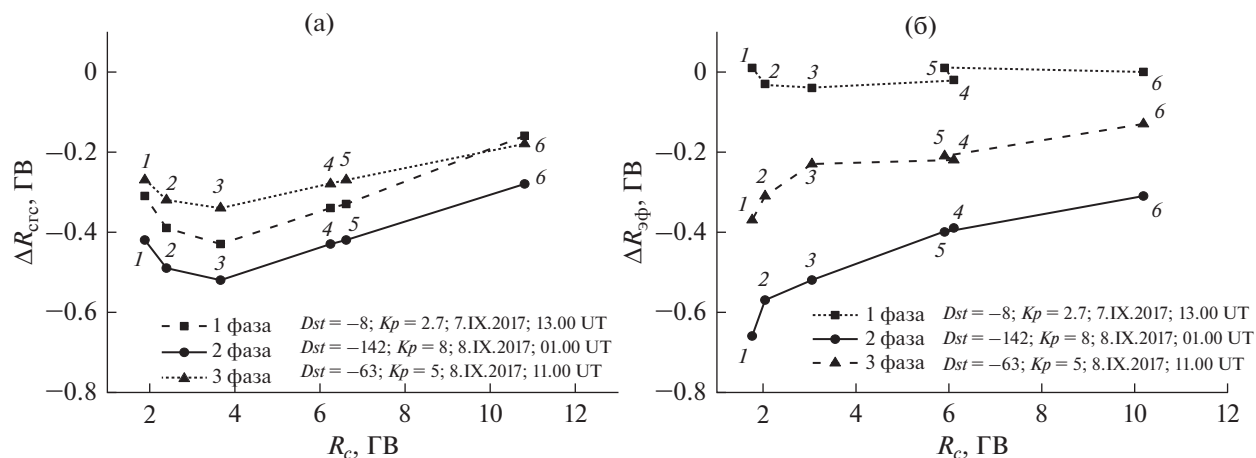


Рис. 2. Изменения геомагнитных порогов $\Delta R_{сгс}$ (а) и $\Delta R_{эф}$ (б) в зависимости от пороговой жесткости станции R_c для различных фаз бури: квадраты – начальная фаза, кружки – главная, треугольники – восстановительная фазы.

но приходом следующего межпланетного возмущения и началом второй несколько меньшей магнитной бури (не показана здесь).

Предварительная фаза магнитной бури характеризуется незначительными колебаниями геомагнитной активности, более заметными в районе высоких широт [10]. На рис. 1 видно, что в промежуток времени 11.00–18.00 UT 7.IX индекс Dst (определяемый по низкоширотным станциям) меняется очень мало, а Kp (определяемый по станциям на более высоких широтах, $\sim 40^\circ$ – 60°) демонстрирует несколько большие колебания. Поэтому мы рассматривали этот промежуток времени как предварительную фазу геомагнитной бури.

В итоге, фазы развития бури 7–8.IX.2017 определены следующим образом: первая фаза (предварительная) – 11.00 UT–18.00 UT, 7.IX.2017, вторая фаза (главная) – 19.00 UT 7.IX.2017–01.00 UT 8.IX.2017, третья фаза (восстановительная) – 02.00 UT–11.00 UT 8.IX.2017.

4. ШИРОТНЫЕ КРИВЫЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ПОРОГОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАЗ БУРИ

На рис. 2 приведены примеры широтного поведения вариаций геомагнитных порогов $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эф}$ в зависимости от пороговых жесткостей R_c выбранных станций для нескольких моментов времени в течение бури. Видно, что максимальное понижение порогов наблюдается на главной фазе ($Dst = -142$ нТл), достигая значений $\Delta R_{сгс} = -0.52$ ГВ и $\Delta R_{эф} = -0.66$ ГВ.

Широтная кривая $\Delta R_{сгс}$ на всех фазах демонстрирует типичную форму такой кривой с максимумом падения жесткости обрезания на средне-

широтных (3–4 ГВ) станциях [1, 6, 8, 14]. В данном случае максимум падения кривой приходится на $R_c = 3.66$ ГВ (ст. Иркутск). Это говорит о том, что распределение наблюдательных значений $\Delta R_{сгс}$ достаточно хорошо отражает конфигурацию магнитосферы во время активности бури.

Модельные значения $\Delta R_{эф}$ не показывают такой типичной зависимости, на главной и восстановительной фазах, они возрастают с возрастанием значений R_c . Видно, что для жесткостей >3 ГВ модельные кривые $\Delta R_{эф}$ на главной фазе демонстрируют хорошее согласие с наблюдательными кривыми $\Delta R_{сгс}$. Причем, если в области малых жесткостей станций КЛ понижение $\Delta R_{эф}$ больше, чем $\Delta R_{сгс}$, то в области более высоких жесткостей понижения практически совпадают, меняясь от -0.3 до -0.5 ГВ. На восстановительной фазе $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ ведут себя приблизительно так же, как и на главной фазе, с той разницей, что падение наблюдательных порогов на всей кривой меньше, чем модельных.

5. ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕОМАГНИТНЫХ ПОРОГОВ И ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ

В этом параграфе мы проанализировали связь между жесткостями обрезания и исследуемыми параметрами электромагнитного поля, солнечного ветра и геомагнитной активности для каждой из шести разноширотных станций КЛ. Коэффициенты корреляции k представлены в виде диаграмм (рис. 3) для всей бури (а, б), главной (в, г) и восстановительной (д, е) фаз. Кроме того, последний столбик K отражает коэффициент корреляции между $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$. Эти рисунки показыва-

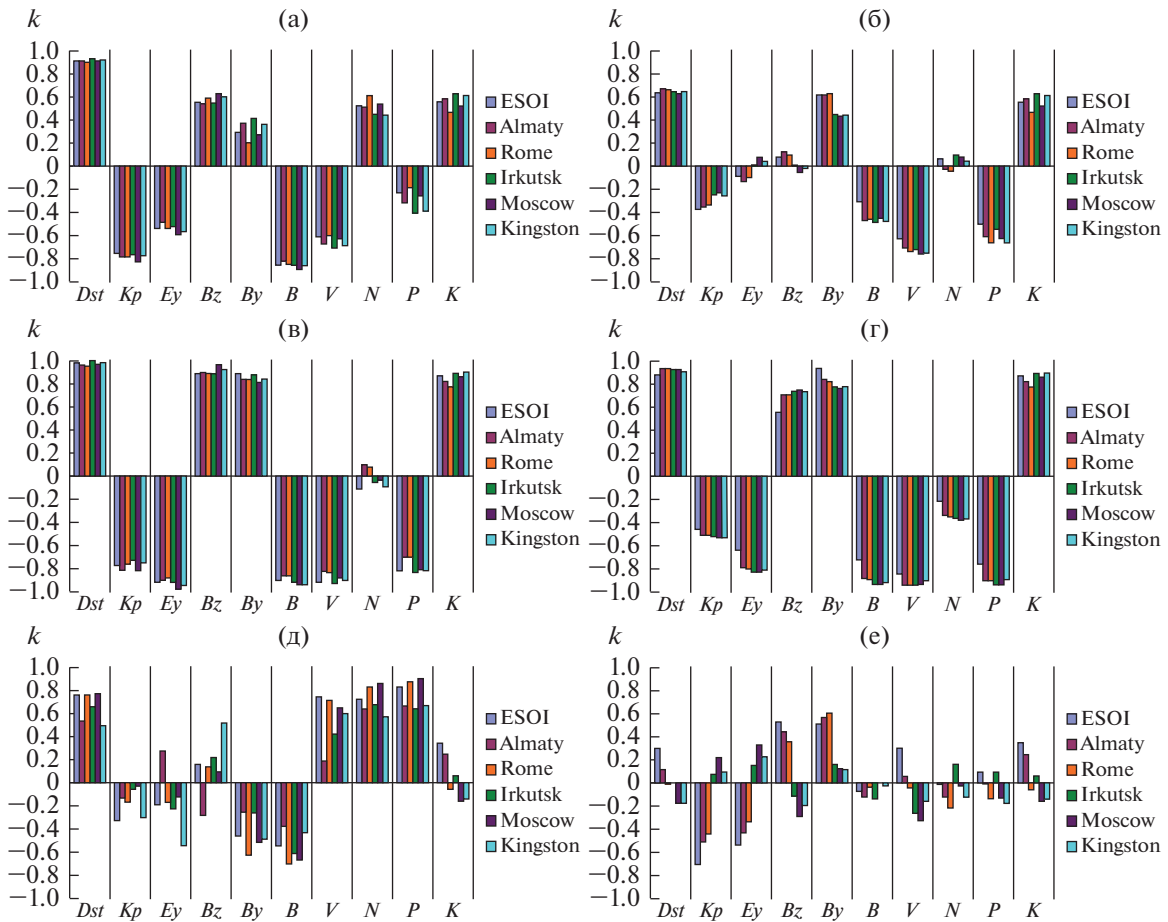


Рис. 3. Корреляция параметров солнечного ветра и геомагнитной активности с $\Delta R_{эф}$ (а, в, д) и $\Delta R_{сгс}$ (б, г, е) для 6 разноширотных станций КЛ для всего периода бури 7–8.IX.2017 – а, б; и ее двух фаз: главной – в, г; восстановительной – д, е.

ют эволюцию отклика ЖГО на изменения исследуемых параметров на каждой станции.

Из рис. 3а–3г видно, что на масштабе всей бури и ее главной фазы связь с исследуемыми параметрами модельных порогов сильнее, чем наблюдательных. Наиболее сильная связь $\Delta R_{эф}$ ($0.8–0.9 \pm 0.05$) наблюдается с Dst , для $\Delta R_{сгс}$ она чуть ниже — ($0.6–0.7 \pm 0.09$). И только на восстановительной фазе для $\Delta R_{сгс}$ k падает до незначительных значений <0.4 . На всем протяжении бури видна также значительная антикорреляция $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эф}$ со скоростью солнечного ветра V . Можно отметить также довольно существенную зависимость от магнитных параметров как модельных значений $\Delta R_{эф}$, так и наблюдательных $\Delta R_{сгс}$. В $\Delta R_{эф}$ вносит основной вклад пара B ($k \approx -0.85 \pm 0.08$) и Bz ($k \approx 0.6 \pm 0.1$), а в $\Delta R_{сгс}$ — B ($\approx -0.5 \pm 0.15$) и By ($\approx 0.5 \pm 0.15$).

Рис. 3а, 3б демонстрирует тот факт, что для $\Delta R_{эф}$ корреляция со всеми параметрами не пока-

зывает четкой зависимости от станции наблюдения, т.е. от широты. В то время как для $\Delta R_{сгс}$ эта зависимость наблюдается для некоторых параметров: связь $\Delta R_{сгс}$ с By максимальна для низких широт ($k \approx 0.65 \pm 0.1$) и минимальна для высоких ($k \approx 0.45 \pm 0.2$), а связь $\Delta R_{сгс}$ с V , напротив, минимальна для низких широт ($k \approx -0.65 \pm 0.1$) и максимальна для высоких ($k \approx -0.75 \pm 0.15$).

На главной фазе (рис. 3в, 3г) корреляция очень высокая, и достигает значений 0.95 практически для всех параметров солнечного ветра и магнитосферы как для $\Delta R_{эф}$, так и для $\Delta R_{сгс}$. Исключение составляет лишь плотность солнечного ветра (N), которая не оказывает практически никакого влияния на геомагнитные пороги. Здесь, как и для всей бури, корреляция параметров СВ и магнитосферы с $\Delta R_{эф}$ не показывают сколько-нибудь четкой картины зависимости от широты станции КЛ. Напротив, корреляция $\Delta R_{сгс}$ с электромагнитными параметрами Ey , B , Bz , By показывает явную тенденцию зависимости от широты.

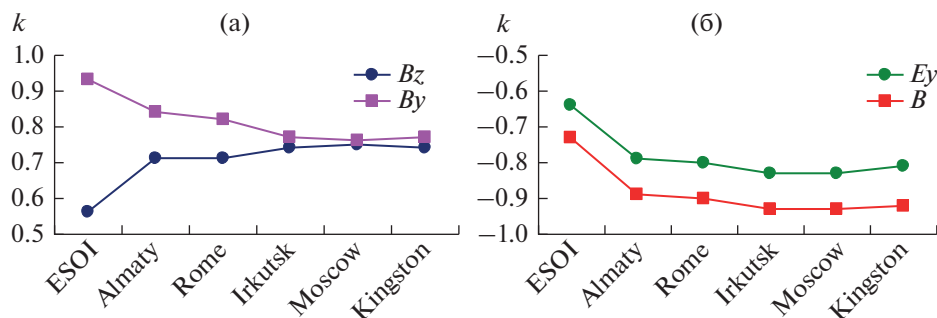


Рис. 4. Широтная зависимость коэффициентов корреляции k между $\Delta R_{\text{сгс}}$ и параметрами ММП для главной фазы.

На восстановительной фазе из рис. 3д, 3е видно, что наибольшая корреляция $\Delta R_{\text{эф}}$ отмечается с Dst и динамическими параметрами солнечного ветра V , N и P . Влияние B и B_y несколько меньше, а влияние B_z фактически отсутствует. Следует отметить, что на восстановительной фазе связь порогов и параметров солнечного ветра и магнитосферы показывает некоторую зависимость от широты, однако эта связь не носит регулярного характера, она хаотична. Что касается $\Delta R_{\text{сгс}}$, то в это время отсутствует связь с Dst . На этой фазе контроль $\Delta R_{\text{сгс}}$ геомагнитной активностью осуществляется через Kp индекс. Видно, что исследуемые параметры вносят гораздо меньший вклад в понижение наблюдательных порогов и по сравнению с $\Delta R_{\text{эф}}$, и по сравнению с тем, каков был этот вклад на главной фазе. Коэффициент корреляции превышает 0.5 лишь для некоторых параметров и для некоторых станций, например для связи с P (Москва), а также с Kp , E_y , и B_z на низкоширотной станции ESOI. Однако, как и для $\Delta R_{\text{эф}}$, зависимость от широты не демонстрирует какой-либо определенной тенденции, она хаотична. Отсутствие регулярных связей, хаотическое поведение k на разных станциях привело и к отсутствию корреляции между $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ (рис. 3д, 3е, последний столбец К).

На рис. 4 приведены изменения k на станциях КЛ. Станции приведены в порядке убывания жесткости станции (возрастания широты). Видно, что корреляция $\Delta R_{\text{сгс}}$ с B_z растет с увеличением широты, а с B_y падает (рис. 4а). Антикорреляция $\Delta R_{\text{сгс}}$ с B и E_y растет с увеличением широты (рис. 4б).

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже указывалось выше, во время бури 7–8.IX.2017 наибольшее понижение порогов наблюдается в максимуме бури на главной фазе ($Dst = -142$ нТл), и составляет 14% для $\Delta R_{\text{сгс}}$ (на

ст. Иркутск) и 35% для $\Delta R_{\text{эф}}$ (на ст. Кингстон). Широтная кривая $\Delta R_{\text{сгс}}$ (R_c) на всех фазах демонстрирует классическую форму с максимумом падения жесткости обрезания на среднеширотных (3–4 ГВ) станциях [1, 6]. Наибольшее падение наблюдательных жесткостей достигается при $R_c = 3.66$ ГВ. Широтные зависимости модельных $\Delta R_{\text{эф}}$ (R_c) не представляют характерной кривой с максимумом падения жесткостей на среднеширотных станциях. На главной и восстановительной фазах они возрастают с возрастанием R_c . Для жесткостей $>3-4$ ГВ модельные кривые $\Delta R_{\text{эф}}$ на главной фазе находятся в хорошем согласии с наблюдательными кривыми $\Delta R_{\text{сгс}}$ (R_c), в то время как при малых жесткостях (высокие широты) кривые $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ расходятся. В работе [8] при исследовании бури в ноябре 2003 г. отмечено, что для жесткостей $R_c < 6$ ГВ широтные зависимости, полученные с использованием модели Ts01, сильно отличаются от зависимостей, полученных с использованием данных нейтронных мониторов. Аналогично в работе [18] сравнивались жесткости обрезания, вычисленные траекторным методом при помощи различных магнитосферных моделей во время нескольких бурь с результатами наблюдений на нейтронных мониторах и космическом аппарате CORONAS-F. Авторы этой работы также утверждают, что для интенсивных бурь результаты для средних широт, полученные с использованием модели Ts01, могут значительно отличаться от наблюдений.

Расхождение модельных и наблюдательных значений в области малых жесткостей (высокие широты) может говорить о том, что модель Ts01 недостаточно хорошо описывает распределение магнитных полей в магнитосфере в области более высоких широт. Возможно, это связано с тем, что модель Ts01, которая использовалась при расчете $R_{\text{эф}}$, не в полной мере учитывает некоторые токовые системы, которые, как выяснилось в последнее время, могут иметь большое значение для раз-

вития сильных геомагнитных бурь. В частности, в работе [19] найдено, что для развития больших бурь существенное значение может иметь система токов DP , развивающихся в высокоширотных областях магнитосферы. Кроме того, модель $T301$ описывает возмущенное магнитное поле внутренней и околоземной магнитосферы в области $R \leq 15R_E$. Энергия, запасенная в хвосте магнитосферы, в том числе в более дальней ее части, инициирует и поддерживает некоторые важные магнитосферные процессы [20, 21]. В то время как модельные геомагнитные пороги $R_{\text{эф}}$ не учитывают влияние поля среднего и дальнего хвоста, регистрируемые на земле космические лучи, использованные для определения $\Delta R_{\text{сгс}}$, испытывают влияние поля всей магнитосферы.

Изменение геомагнитных порогов ΔR (как $\Delta R_{\text{сгс}}$, так и $\Delta R_{\text{эф}}$) на масштабе всей бури 7–8.IX.2017, а также на ее главной фазе наиболее сильно коррелирует с Dst -индексом, что свидетельствует о том, что кольцевой ток играет главную роль в контроле вариаций жесткостей обрезания КЛ. Значительная чувствительность к Dst является самой стабильной чертой взаимодействия геомагнитных порогов с геомагнитосферой, которая отмечена ранее. В [22] найдено, что связь ΔR с геомагнитной активностью демонстрирует четкую закономерность — корреляция увеличивается с уменьшением Dst , т.е. с ростом интенсивности бури. При этом, сильная связь с Dst обычно поддерживается на всех фазах бури. Поэтому достаточно неожиданным является отсутствие связи $\Delta R_{\text{сгс}}$ с Dst на восстановительной фазе исследуемой бури. На этой фазе контроль $\Delta R_{\text{сгс}}$ геомагнитной активностью осуществляется через Kp индекс. Dst определяется по вариациям наземного магнитного поля на низкоширотных станциях (18° – 35°) и отражает эффект экваториального кольцевого тока. Кроме того, в Dst также вносят вклад частичный кольцевой ток [23], токи на магнитопаузе [24, 25] и поперечные токи хвоста [26–28]. Индекс Kp определяется по субавроральным станциям (44° – 62°). Во время сильного магнитного возмущения, когда авроральный овал смещается к югу, станции, входящие в сеть Kp , начинают фиксировать эффекты магнитосферных токов области высоких широт. Таким образом, можно предположить, что на восстановительной фазе бури 7–8.IX.2017 вариации жесткости обрезания $\Delta R_{\text{сгс}}$ регулировались не столько распадом кольцевого тока, сколько влиянием высокоширотных токовых систем. В вариациях $\Delta R_{\text{эф}}$ такого эффекта на восстановительной фазе не наблюдается, Dst значительно влияет на $\Delta R_{\text{эф}}$, а вклад Kp практически отсутствует. Эту разницу в

чувствительности $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ к индексам геомагнитной активности, по-видимому, опять надо отнести к недостаточной чувствительности модели $T301$ к процессам, происходящим в высоких широтах магнитосферы в случае рассматриваемой бури.

Рассмотрение зависимостей изменений порогов от исследуемых параметров на главной фазе бури, показывает, что модельные и наблюдательные геомагнитные пороги демонстрируют очень похожую картину. В вариации ΔR вносят вклад практически все параметры магнитосферы и солнечного ветра. При этом, корреляция между $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ высокая ($k = 0.9 \pm 0.1$), как видно из последнего столбца рис. 3в, 3г. Наиболее заметная разница в рис 3в и 3г заключается в том, что в корреляции $\Delta R_{\text{сгс}}$ как с электромагнитными параметрами, так и с динамическими V и P просматривается заметная зависимость от широты станции наблюдения. В то же время, корреляция $\Delta R_{\text{эф}}$ с параметрами ММП, СВ и магнитосферы не показывают сколько-нибудь четкой картины зависимости от широты станции КЛ.

Отдельного рассмотрения требует восстановительная фаза бури, диаграммы которой (рис. 3д, 3е) резко отличаются от диаграмм, характеризующих ситуацию на масштабе всей бури и в главной фазе. Во-первых, коэффициенты корреляции на этом этапе сильно уменьшаются, особенно это заметно для $\Delta R_{\text{сгс}}$. Следует отметить, что для тех немногих бурь, для которых в литературе рассматривались зависимости ΔR от параметров магнитосферы и межпланетной среды, такого уменьшения k на восстановительной фазе не наблюдалось. Для бурь 20.XI.2003 [29], 7–8.XI.2004 [30] и 14.XII.2006 [31] k между ΔR и параметрами гелио- и магнитосферы на восстановительной фазе были либо одного порядка с соответствующими k на главной фазе, либо превышали их. Кроме того, из рис. 2д, 2е видно, что на восстановительной фазе коэффициенты корреляции $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ со всеми исследуемыми параметрами для разных станций отличаются друг от друга хаотическим образом. Такая хаотизация отклика ΔR на параметры магнитосферы может быть связана с особенностями возмущенного периода в магнитосфере в начале сентября 2017 г. Как упоминалось во введении, в это время наблюдалась повышенная активность на Солнце, которая генерировала вспышки и CME . На пути к Земле CME взаимодействовали между собой, а также с другими межпланетными образованиями, поэтому в околоземном пространстве сформировалась сложная комплексная структура, содержащая ударные волны, 2 области сжатия (“sheaths”) перед межпланетными CME , два маг-

нитных облака, и два магнитных “поршня” с увеличенной геоэффективностью [32, 33]. Южная компонента B_z , ассоциированная со сложным комплексом областей сжатия и магнитного облака [17, 32], инициировала магнитную бурю с максимальным падением $Dst = -142$ нТл в 01.00 UT 8.IX.2017 (рис. 1). Восстановление магнитосферы после главной фазы бури было прервано через несколько часов приходом второй области сжатия и последовавшего за ней второго магнитного облака с полем южной направленности [17], которое генерировало повторное падение Dst индекса до -123 нТл. Такая нестандартная восстановительная фаза бури, когда наблюдались противоположные тенденции – восстановление магнитосферы от предыдущего возмущения, конкурировавшее с развитием нового возмущения – могло обусловить низкие значения k между ΔR и параметрами ММП, СВ и магнитосферы, а также хаотическое нерегулярное поведение k на разных станциях наблюдения. Меняющиеся условия в токовых системах могут вызывать частичный кольцевой ток с сильной анизотропией, а представленные данные по $\Delta R_{\text{сгс}}$ изотропны, поэтому рассчитанные $\Delta R_{\text{сгс}}$ могут не соответствовать реальности и, следовательно, плохо коррелировать с Dst .

ВЫВОДЫ

Мы рассчитали геомагнитные пороги R во время возмущенной магнитосферы 7–8.IX.2017 двумя методами. Далее мы рассчитали корреляции ΔR с параметрами межпланетной среды и магнитосферы во время эволюции бури – в ее начальной, главной и восстановительной фазах и рассмотрели широтные особенности полученных корреляций. Мы получили следующие результаты:

1. Во время бури 7–8.IX.2017 наибольшее понижение порогов наблюдается в максимуме бури ($Dst = -142$ нТл), достигая значений $\Delta R_{\text{сгс}} = -0.52$ ГВ (Иркутск) и $\Delta R_{\text{эф}} = -0.66$ ГВ (Кингстон).

2. Во время всех фаз бури наблюдательная широтная кривая $\Delta R_{\text{сгс}}(R_c)$ принимает классическую форму с максимумом падения жесткости обрезания на среднеширотных станциях ($R_c = 3.66$ ГВ). Широтное распределение модельных $\Delta R_{\text{эф}}$ существенно отличается от распределения наблюдательных $\Delta R_{\text{сгс}}$, для средних и высоких широт ($R_c \leq 3.66$ ГВ, $\varphi \geq 53^\circ$ N и $\varphi \geq 40^\circ$ S).

3. Наши результаты свидетельствуют о том, что во время бури 7–8.IX.2017 модель магнитосферы $Ts01$ недостаточно хорошо отражала простран-

ственную конфигурацию возмущенной магнитосферы в области высоких широт.

4. Изменение как наблюдательных, так и модельных геомагнитных порогов на масштабе всей бури 7–8.IX.2017 наиболее сильно коррелирует с Dst -индексом, что свидетельствует о том, что кольцевой ток играет главную роль в контроле вариаций жесткостей обрезания КЛ. Также виден значительная зависимость $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ от параметров солнечного ветра V и несколько меньшая от магнитных параметров. $\Delta R_{\text{эф}}$ контролируется парой B и B_z , а $\Delta R_{\text{сгс}} - B$ и B_y .

5. Чувствительность ΔR к динамическим и магнитным параметрам межпланетной среды различна на разных фазах бури и отличается от чувствительности, посчитанной на масштабе всей бури.

6. Для $\Delta R_{\text{сгс}}$ корреляция с магнитными параметрами в главной фазе демонстрирует тенденцию изменяться в зависимости от станции наблюдения регулярным образом. Для $\Delta R_{\text{эф}}$ такой тенденции не наблюдается. На восстановительной фазе наблюдается хаотическое нерегулярное поведение k в зависимости от станции наблюдения, вызванное особенностями бури и связанными с ними анизотропиями.

Взаимосвязь вариаций геомагнитных порогов КЛ с параметрами геомагнитной активности и магнитосферы различна на разных фазах бури, поскольку она обусловлена динамикой глобальных магнитосферных токовых систем, которые в процессе эволюции магнитного возмущения развиваются и затухают различным образом в разные периоды времени. Особенности взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы в процессе эволюции бури определяют специфический отклик геомагнитных порогов КЛ на параметры гелиосферы и магнитосферы на разных фазах бури. В частности, особенности корреляции порогов с параметрами гелио- и магнитосферы на восстановительной фазе бури 7–8.IX.2017 диктовались особенностями этой бури, которые были обусловлены сложной структурой в околоземном пространстве, содержащей ударные волны, области сжатия, магнитные облака, и магнитные “поршни”.

Расчеты по методу СГС получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckp-rg.ru/ckp/3056/>) и научной установки “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей” <https://ckp-rg.ru/usu/433536/>.

Конфликт интересов: авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dorman L.I.* Elementary particle and cosmic ray physics. Elsevier. New York. 1963. 456 p.
2. *Kress B.T., Hudson M.K., Selesnick R.S. et al.* Modeling geomagnetic cutoffs for space weather applications // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. № 7. P. 5694–5702. <https://doi.org/10.1002/2014JA020899>
3. *Буров В.А., Мелешков Ю.С., Очелков Ю.П.* Методика оперативной оценки уровня радиационной опасности, обусловленной возмущениями космической погоды, при авиаперевозках // *Гелиогеофизические исслед.* 2005. Вып. 7. С. 1–41.
4. *Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V. et al.* Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // *Space weather.* 2005. V. 3. S01001. <https://doi.org/10.1029/2003SW000056>
5. *Mask E.* Starship: Earth to Earth in less than 60 minutes. // 68th International Astronautic Congress. Adelaide, Australia. 25–29 Sep. 2017.
6. *Flueckiger E.O., Shea M.A., Smart D.F.* On the latitude dependence of cosmic ray cutoff rigidity variations during the initial phase of a geomagnetic storm // *Proc. 20th Int. Conf. Cosmic Rays.* August 1987. Moscow. USSR. 1987. V. 4. P. 2016–2020.
7. *Antonova O.F., Baisultanova L.M., Belov A.V. et al.* The longitude and latitude dependences of the geomagnetic cutoff rigidity variations during strong magnetic storms // *Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf.* January 1990. Adelaide, Australia. V. 7. P. 10–13.
8. *Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E. et al.* Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A09S20. <https://doi.org/10.1029/2005JA011067>
9. *Данилова О.А., Демина И.А., Птицына Н.Г. и др.* Картирование жесткости обрезания космических лучей во время главной фазы магнитной бури 20 ноября 2003 г. // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2019. Т. 59. № 2. 3. С. 160–167. <https://doi.org/10.1134/S0016794019020056>
10. *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. (4-ое издание). Изд. Ленинградского Университета, Ленинград. 1978. 592 стр.
11. *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.* 1965. V. 70. P. 4117–4130.
12. *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // *J. Geophys. Res.* 2002a. 107. A8. <https://doi.org/10.1029/2001JA000219>
13. *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parametrization and fitting to observation // *J. Geophys. Res.* 2002b. 107. A8. <https://doi.org/10.1029/2001JA000220>
14. *Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E.* Diagnostics of the electromagnetic characteristics of the interplanetary medium based on cosmic ray effects // *Geomagn. Aeron. (Engl. Transl.).* 2013. V. 53, iss. 4. P. 430–440.
15. *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // *JGR.* 2005. V. 110. A02104. <https://doi.org/10.1029/2004JA010649>
16. *Chertok I.M., Belov A.V., Abunin A.A.* Solar Eruptions, Forbush Decreases and Geomagnetic Disturbances from Outstanding Active Region 12673 // *Space Weather.* 2018. V. 16. P. 1549–1568. <https://doi.org/10.1029/2018SW001899>
17. *Hajra R., Tsurutani B.T., Lakhina G.S.* The Complex Space Weather Events of 2017 September // *ApJ.* 2020. V. 899. № 1. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aba2c5>
18. *Kudela K., Bucik R.* Low Energy Cosmic Rays and the Disturbed Magnetosphere // *Proc. 2nd Int. Symp. SEE-2005.* Nor-Amberd, Armenia. 2005. P. 57–62. <https://arxiv.org/pdf/1303.4052.pdf>
19. *Левитин А.Е., Дремухина Л.А., Громова Л.И. и др.* Генерация магнитного возмущения в период исторической магнитной бури в сентябре 1859 г. // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2014. Т. 54. № 3. с. 324–332. <https://doi.org/10.7868/S0016794014030110>
20. *Ganushkina N.Y., Liemohn M.W., Dubyagin S.* Current systems in the Earth's magnetosphere // *Reviews of Geophysics.* 2018. V. 56. P. 309–332. <https://doi.org/10.1002/2017RG000590>
21. *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. V. 103. A9. P. 20297–20331.
22. *Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И. и др.* Влияние параметров солнечного ветра и геомагнитной активности на вариации жесткости обрезания космических лучей во время сильных магнитных бурь // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2019. Т. 59. № 5. С. 569–577. <https://doi.org/10.1134/S0016793219050098>
23. *Liemohn M.W., Kozyra J.U., Thomsen M.F. et al.* Dominant role of the asymmetric ring current in producing stormtime *Dst* // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. A6. P. 10.883–10.904. <https://doi.org/10.1029/2000JA000326>
24. *Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T.* An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst* // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. Is. 31. P. 4204–4214. <https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204>
25. *Siscoe G.L., McPherron R.L., Jordanova V.K.* Diminished contribution of ram pressure to *Dst* during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110 P. A12227. <https://doi.org/10.1029/2005JA011120>
26. *DuByagin S., Ganushkina N., Kubyschkina M. et al.* Contribution from different current systems to SYM and ASY midlatitude indices // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 7243–7263. <https://doi.org/10.1002/2014JA020122>

27. *Ohtani S., Nose M., Rostoker G. et al.* Storm-substorm relationship: Contribution of the tail current to *Dst* // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. A10. P. 21199–21209. <https://doi.org/10.1029/2000JA000400>
28. *Turner N.E., Baker D.N., Pulkkinen T.I. et al.* Evaluation of the tail current contribution to *Dst* // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № A3. P. 5431–5439. <https://doi.org/10.1029/1999JA000248>
29. *Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И. и др.* Динамика жесткости обрезания космических лучей и параметров магнитосферы во время различных фаз бури 20 ноября 2003 г. // *Геомагнетизм и аэронаука*. 2021. Т. 61. № 2. С. 160–171. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010120>
30. *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 Аэронаука*. 2020. Т. 60. № 3. С. 281–292. <https://doi.org/10.31857/S0016794020020145>
31. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.N. et al.* PAMELA's measurements of geomagnetic cutoff variations during the 14 December 2006 storm // *Space weather*. 2016. V. 14. № 3. <https://doi.org/10.1002/2016SW001364>
32. *Shen C., Xu M., Wang Y. et al.* Why the Shock-ICME Complex Structure Is Important: Learning from the Early 2017 September CMEs // *The Astrophysical Journal*. 2018. V. 861. № 1. pp. 861–960. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac204>
33. *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 // *Astrophysical Journal Supplement Series*. 2020. V. 247(1). <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6216>