

УДК 523-62,523.9

ДИНАМИКА ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ РАЗНЫХ ФАЗ БУРИ 20 НОЯБРЯ 2003 г.

© 2021 г. Н. Г. Птицына^{1, *}, О. А. Данилова^{1, **}, М. И. Тясто¹, В. Е. Сдобнов²

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

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

*e-mail: nataliaptitsyna@ya.ru

**e-mail: md1555@mail.ru

Поступила в редакцию 04.04.2020 г.

После доработки 24.04.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Рассчитаны корреляции вариаций жесткостей геомагнитного обрезания космических лучей с Dst - и Kp -индексами геомагнитной активности, параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) во время трех фаз магнитной бури 20–21 ноября 2003 г. — перед началом бури, в ее главной и восстановительной фазах. На всех этапах бури вариации жесткости обрезания наиболее тесно коррелируют с Dst -индексом. Фиксировалась значительная корреляция с Vu -компонентой ММП и величиной поля B , причем связь с Vu доминировала в главной фазе, а с B — в восстановительной. В главной фазе также наблюдается высокая корреляция с динамическими параметрами солнечной активности, особенно со скоростью солнечного ветра. Впервые, насколько нам известно, обнаружены явления гистерезиса во взаимосвязи жесткостей обрезания космических лучей и параметров гелио- и магнитосферы на масштабе магнитной бури (на примере станции Москва). Петлеобразные диаграммы сформировались потому, что траектории изменения значений жесткостей обрезания в зависимости от исследуемых параметров во время интенсификации бури (развитие токовых систем) не совпадали с траекториями на восстановительной фазе (распад токовых систем). Взаимосвязь жесткостей обрезания с Dst и Kp характеризовалась узкой петлей гистерезиса, а с параметрами ММП — широкой. Петли гистерезиса для взаимосвязи жесткостей обрезания с плотностью и давлением солнечного ветра были неупорядоченными.

DOI: 10.31857/S0016794021010120

1. ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи проникают внутрь магнитосферы из-за их магнитной жесткости R , которая определяется как момент на единицу заряда. Жесткость геомагнитного обрезания или геомагнитный порог — это R , ниже которого поток частиц обрезан из-за магнитного экранирования. Геомагнитные бури уменьшают геомагнитное экранирование вследствие уменьшения поля внутри магнитосферы вследствие формирования кольцевого тока, токов магнитопаузы, хвоста магнитосферы и продольных высокоширотных токов. В результате этого космические частицы могут проникать на более низкие широты.

В ряде работ установлена различной степени связь вариаций геомагнитных порогов ΔR и изменений геомагнитной активности, выраженной геомагнитными индексами Dst и Kp [Belov et al.,

2003; Kress et al., 2010; Тясто и др., 2011; Tyssøy and Stadsnes, 2014; Adriani et al., 2016; Птицына и др., 2019]. В частности, в работе [Птицына и др., 2019] обнаружена высокая корреляция ΔR с Dst для семи бурь 23 и 24 солнечных циклов, при этом корреляция изменялась регулярным образом, она увеличивалась с уменьшением Dst , т.е. с ростом интенсивности бури. В то же время, для бури в декабре 2006 г., наблюдалась наиболее сильная корреляция широты обрезания не с Dst , а с Kp [Adriani et al., 2016].

На основе различных экспериментальных и теоретических подходов, также неоднократно рассматривалась зависимость ΔR от параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП). В работах [Kanekal et al., 1998; Adriani et al., 2016] найдено, что геомагнитные пороги лучше всего коррелировали с параметрами ММП и скоростью солнечного ветра V . Напро-

тив, в работах [Shimazu, 2009; Kress et al., 2010; Tysøy and Stadsnes, 2014] при проникновении частиц в возмущенную магнитосферу получена преимущественная зависимость R от динамического давления СВ P по сравнению со знаком и интенсивностью Bz . Птицына с соавторами [2019] нашли, что наиболее геоэффективным межпланетным параметром для четырех сильных бурь 24 цикла оказалась скорость солнечного ветра V , в то время как корреляция с величиной Bz выражена слабо.

Таким образом, результаты исследования зависимости ΔR от межпланетных параметров и геомагнитной активности противоречивы. Это может быть обусловлено тем обстоятельством, что интенсификация и распад токовых систем, которые контролируются поступлением в магнитосферу энергии СВ, происходят в различных режимах и на различных масштабах времени. И действительно, есть указания на то, что зависимость ΔR от этих процессов может быть различной для разных этапов эволюции магнитной бури. Однако контроль ΔR параметрами гелио- и магнитосферы 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] — для сильной бури 7–8 ноября 2004 г.

Целью данной работы было проследить динамику изменений геомагнитных порогов в зависимости от параметров межпланетной среды и магнитосферы во время эволюции магнитной супербури 20–21 ноября 2003 г. Эта статья является продолжением работ [Тясто и др., 2008; Птицына и др., 2019], где исследовались вариации жесткостей обрезания за весь период развития этой бури. Новым элементом данной работы является то, что мы провели анализ корреляций ΔR с межпланетными параметрами и индексами геомагнитной активности во время каждой из трех фаз бури — на предварительном этапе (перед бурей), в главной и восстановительной фазах. Кроме того, добавлен расчет и анализ корреляций ΔR с общим межпланетным магнитным полем B , E_y -компонентой электрического поля и Kp -индексом геомагнитной активности. Специальное внимание уделено исследованию траекторий изменения значений ΔR в зависимости от рассматриваемых параметров, как во время развития токовых систем, так и во время их распада.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДАННЫЕ

2.1. Методы

Мы оценивали связь вариаций жесткости геомагнитного обрезания с изменением параметров

ММП, СВ и геомагнитной активности в период 18–24 ноября 2004 г. Для этого ΔR были рассчитаны двумя разными способами — методом спектрографической глобальной съемки (СГС) и методом прослеживания траекторий частиц космических лучей в модельном магнитном поле.

Метод СГС основан на рассмотрении процессов изменения энергии заряженных частиц в регулярных электромагнитных полях гелиосферы [Dvornikov, Sdobnov, 2002]. Метод использует для получения жесткостей обрезания R наблюдательные данные, полученные при помощи большого комплекса наземной регистрирующей аппаратуры (мировая сеть нейтронных мониторов). Вариации жесткостей обрезания, полученные этим методом ($\Delta R_{\text{сгс}}$), следуя терминологии, принятой в работе [Птицына и др., 2019], будем считать “наблюдательными”.

При расчете геомагнитных порогов методом прослеживания траекторий частиц КЛ [McCracken et al., 1962; Shea et al., 1965] задается магнитное поле магнитосферы, которое обычно описывается какой-либо моделью. Для расчета $\Delta R_{\text{эф}}$ нами была использована магнитосферная модель $T301$ [Tsyganenko, 2002a, b; Tsyganenko et al., 2003]. Вариации жесткостей обрезания, полученные этим методом ($\Delta R_{\text{эф}}$), будем считать “модельными” [Птицына и др., 2019].

Используемые методы подробно описаны в работах [Tyasto et al., 2013; Тясто и др., 2015]. $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ определялись как разности между значениями геомагнитных порогов, рассчитанными для каждого часа в период бури, и жесткостями в спокойный период перед бурей. За “спокойные” ($Dst \approx 0$) были взяты среднесуточные значения порогов 12 октября 2003 г.

Коэффициенты корреляции k между жесткостями обрезания 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 таким образом, чтобы они в спокойное время охватывали основную область пороговых жесткостей R_c , подверженных влиянию геомагнитного поля: Токио — 11.0 ГВ, Алматы — 6.18 ГВ, Рим — 6.10 ГВ, Иркутск — 3.25 ГВ, Москва — 2.12 ГВ, Хобарт — 1.76 ГВ.

Коэффициенты k и стандартные ошибки получены из анализа регрессионных уравнений отдельно по выборкам наблюдений для периодов каждой из трех фаз — предварительной, главной и восстановительной.

2.2. Данные

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

На рисунке 1 приведены параметры солнечного ветра и индексы геомагнитной активности во время бури 20–21 ноября 2003 г.; на верхней панели представлены значения $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ для ст. Москва. Изменения геомагнитных порогов на других станциях качественно не отличаются от ΔR для Москвы (соответствующие кривые приведены в работе [Тясто и др., 2008]).

Значения B , B_y и B_z ММП иллюстрируют конфигурацию межпланетной структуры ответственной за эту бурю. Ударная волна пришла в 07:40 UT, вызвав резкое увеличение B ММП до 30 нТл, а также всплеск положительного B_y ММП [Веселовский и др., 2004; Ермолаев и др., 2005]. Полярность B_z ММП остается положительной в течение трех часов после прихода волны. В 11:20 UT B_z поворачивается к югу, достигая -50 нТл в 15:50 UT.

С учетом вышеперечисленных особенностей мы разбили период магнитной бури 20–21 ноября 2003 г. на три фазы: период перед бурей, т.е. предварительная фаза бури, с 02:00 UT по 11:00 UT 20 ноября, главная фаза с 12:00 UT по 19:00 UT 20 ноября, фаза восстановления с 20:00 UT 20 ноября по 23:00 UT 21 ноября.

На средних и низких широтах максимальное понижение геомагнитных порогов по сравнению с порогом в главном поле (1.8 ГВ) достигается в 18:00 UT, за час до максимума геомагнитной бури ($Dst = -472$).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Предварительная фаза бури

Корреляция жесткости геомагнитного обрезания с параметрами гелио- и магнитосферы для предварительной фазы бури (с 02:00 до 11:00 UT 20 ноября 2003 г.) представлены в табл. 1. В верхней части таблицы показаны коэффициенты корреляции $\Delta R_{эф}$ с исследуемыми параметрами, в нижней части — $\Delta R_{сгс}$. Из таблицы 1 видно, что на предварительной фазе бури обнаружилась значительная корреляция (>0.7) вариаций модельных геомагнитных порогов $\Delta R_{эф}$ с геомагнитными параметрами Dst и K_p , а также с плотностью солнечного ветра N . В то же время наблюдательные $\Delta R_{сгс}$ не показали практически никакой связи с исследуемыми параметрами гелио- и магнитосферы. Исключение составили коэффициенты корреляции с азимутальной компонентой межпланетного

магнитного поля B_y ; k для станций Рим и Алматы было -0.67 ± 0.04 , -0.67 ± 0.05 соответственно.

3.2. Главная фаза бури

В таблице 2 представлена корреляция жесткости геомагнитного обрезания с параметрами гелио- и магнитосферы для главной фазы бури 20–21 ноября 2003 г. В верхней части таблицы показаны коэффициенты корреляции исследуемых параметров с $\Delta R_{эф}$, в нижней части — с $\Delta R_{сгс}$. Из таблицы 2 видно, что во время главной фазы бури наблюдалась значительная корреляция как $\Delta R_{эф}$, так и $\Delta R_{сгс}$ почти со всеми исследуемыми параметрами СВ. Наибольшая корреляция $\Delta R_{сгс}$ наблюдается с Dst -индексом. На всех станциях коэффициенты k для $\Delta R_{сгс}$ были в пределах 0.86–0.96. Корреляция Dst с $\Delta R_{эф}$ на всех станциях была еще выше 0.97–0.99. Корреляция ΔR с геомагнитной активностью, выраженной K_p -индексом, с учетом ошибки была значительно меньше (среднее по всем станциям $k = 0.74 \pm 0.3$ для $\Delta R_{сгс}$ и $k = 0.80 \pm 0.33$ для $\Delta R_{эф}$).

Анализ связи ΔR с параметрами ММП во время главной фазы показал наибольшую корреляцию с B_y -компонентой. Очень высокий коэффициент корреляции $k = 0.85–0.96$ получен для $\Delta R_{сгс}$, для $\Delta R_{эф}$ он еще выше 0.93–0.98. Корреляция с общим полем B была незначительной $k = 0.43–0.79$, а ошибки определения k были высокими. Не наблюдалось сколько-нибудь существенной корреляция ΔR как с B_z -компонентой, так и с азимутальной компонентой электрического поля $E_y = -VB_z$.

Во время главной фазы фиксировалась высокая корреляция $\Delta R_{сгс}$ со всеми динамическими параметрами СВ — плотностью, скоростью и давлением. Коэффициенты k были наибольшими при корреляции со скоростью V , достигая для всех станций 0.80–0.94 для $\Delta R_{сгс}$, для $\Delta R_{эф}$ k был еще выше 0.91–0.95. Корреляция с динамическим давлением P и плотностью N лежала в пределах 0.80–0.83 для $\Delta R_{сгс}$, и 0.77–0.80 для $\Delta R_{эф}$. При этом связь как с N , так и с P носила отрицательный характер.

Можно заключить, что во время главной фазы наиболее геоэффективными параметрами, корреляция с которыми превышает по абсолютной величине $|k| \geq 0.77$, являются Dst и B_y , а также все динамические параметры СВ — V , N , P .

3.3. Фаза восстановления бури

В таблице 3 представлена корреляция жесткости геомагнитного обрезания с параметрами гелио- и магнитосферы для восстановительной фазы бури. В верхней части таблицы показаны коэффициенты корреляции исследуемых пара-

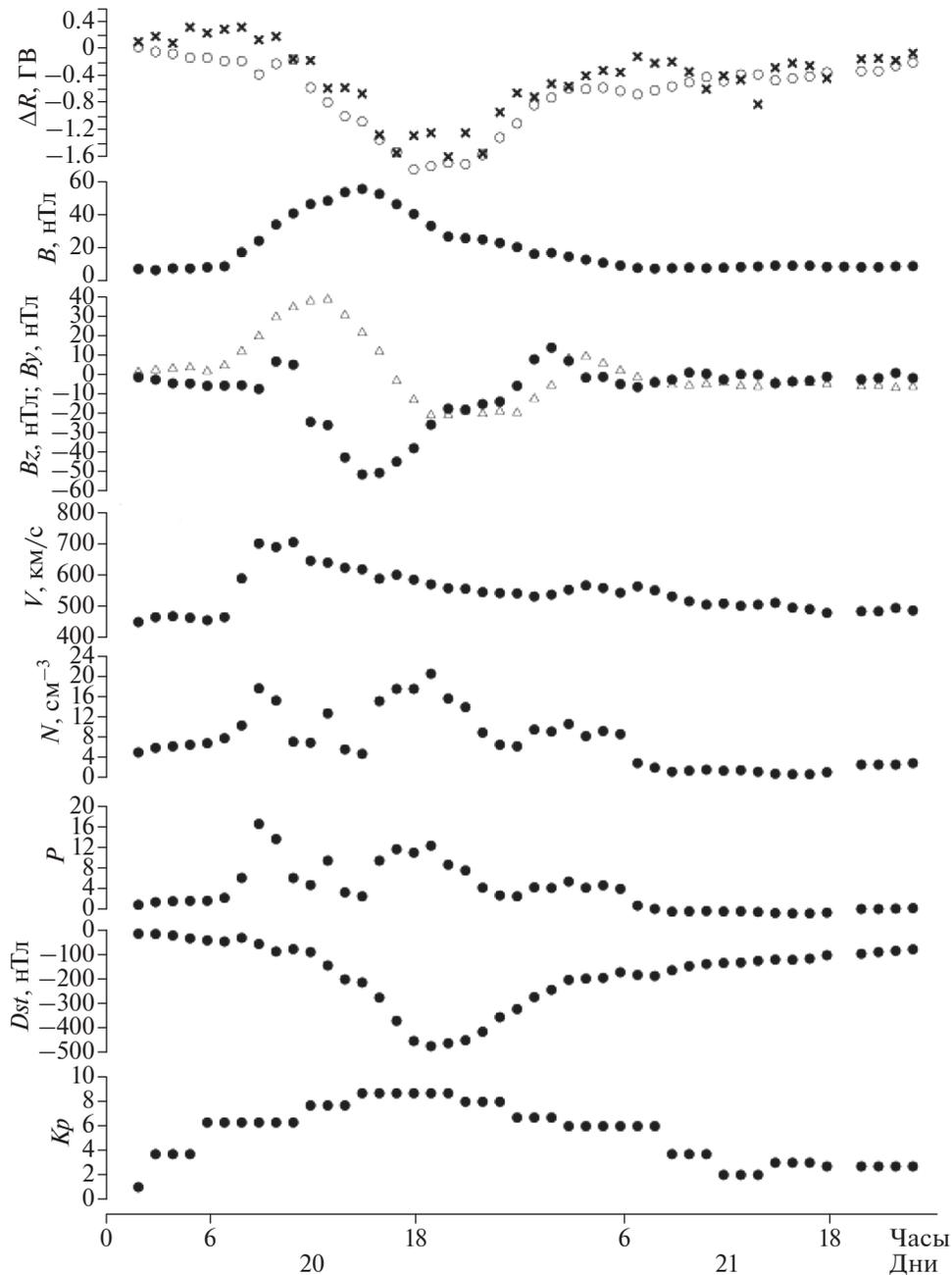


Рис. 1. Межпланетные параметры и индексы геомагнитной активности 20–21 ноября 2003 г. B_z ММП – черные кружки, B_y ММП – треугольники. На верхней панели показаны изменения жесткостей обрезания $\Delta R_{эф}$ (кружки) и $\Delta R_{сгс}$ (крестики) для станции Москва.

метров с $\Delta R_{эф}$, в нижней части – с $\Delta R_{сгс}$. Из таблицы 3 видно наличие значительной корреляции $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ со всеми параметрами гелио- и магнитосферы. Во время этой фазы бури снизилась зависимость от B_y , которая была доминирующей на главной фазе, в то же время повысилась зависимость от B_z (max $k = 0.64 \pm 0.33$ для $\Delta R_{сгс}$ и 0.70 ± 0.26 для $\Delta R_{эф}$ в Иркутске) и особенно от общего поля B (для $\Delta R_{сгс}$ $k = -0.94 \pm 0.15$ и для $\Delta R_{эф}$

максимальное $k = -0.94 \pm 0.13$ в Иркутске). По сравнению с главной фазой корреляции $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ с динамическими параметрами стали несколько меньше, но оставались довольно значительными. Средние по всем станциям коэффициенты корреляции для $\Delta R_{сгс}$ с N , V и P были $k = -0.77 \pm 0.21$, -0.52 ± 0.29 , -0.78 ± 0.21 , а для $\Delta R_{эф}$ соответственно были $k = -0.75 \pm 0.22$, -0.67 ± 0.22 , -0.79 ± 0.21 .

Таблица 1. Корреляция $\Delta R_{\text{эф}}$ с параметрами гелио- и магнитосферы для предварительной фазы бури 20 ноября 2003 г.

$\Delta R_{\text{эф}}$	Станции						
парам	Токио	Алматы	Рим	Иркутск	Москва	Хобарт	средние
<i>Dst</i>	0.87 ± 0.03	0.81 ± 0.05	0.61 ± 0.05	0.69 ± 0.08	0.66 ± 0.09	0.76 ± 0.11	0.73 ± 0.08
<i>Kp</i>	-0.83 ± 0.03	-0.83 ± 0.04	-0.66 ± 0.05	-0.80 ± 0.06	-0.78 ± 0.07	-0.82 ± 0.09	-0.79 ± 0.03
<i>Bz</i>	-0.17 ± 0.05	-0.10 ± 0.08	0.12 ± 0.06	0.11 ± 0.11	0.11 ± 0.12	-0.01 ± 0.16	0.01 ± 0.10
<i>By</i>	-0.73 ± 0.04	-0.72 ± 0.05	-0.33 ± 0.06	-0.56 ± 0.09	-0.57 ± 0.10	-0.62 ± 0.13	-0.59 ± 0.08
<i>B</i>	-0.72 ± 0.04	-0.72 ± 0.05	-0.30 ± 0.06	-0.55 ± 0.09	-0.54 ± 0.10	-0.62 ± 0.13	-0.58 ± 0.08
<i>Ey</i>	0.12 ± 0.05	0.06 ± 0.08	-0.14 ± 0.06	-0.16 ± 0.10	-0.17 ± 0.11	-0.04 ± 0.16	-0.06 ± 0.09
<i>N</i>	-0.79 ± 0.03	-0.70 ± 0.05	-0.77 ± 0.04	-0.81 ± 0.06	-0.88 ± 0.06	-0.83 ± 0.09	-0.80 ± 0.06
<i>V</i>	-0.79 ± 0.03	-0.78 ± 0.05	-0.43 ± 0.06	-0.69 ± 0.08	-0.72 ± 0.08	-0.73 ± 0.11	-0.69 ± 0.07
<i>P</i>	-0.81 ± 0.03	-0.73 ± 0.05	-0.66 ± 0.05	-0.77 ± 0.07	-0.84 ± 0.06	-0.80 ± 0.10	-0.77 ± 0.06
$\Delta R_{\text{сгс}}$							
парам	Токио	Алматы	Рим	Иркутск	Москва	Хобарт	средние
<i>Dst</i>	-0.03 ± 0.08	0.59 ± 0.05	0.57 ± 0.05	0.40 ± 0.09	0.33 ± 0.14	0.33 ± 0.2	0.37 ± 0.10
<i>Kp</i>	-0.48 ± 0.07	-0.38 ± 0.06	-0.33 ± 0.03	-0.05 ± 0.1	0.06 ± 0.15	0.07 ± 0.21	-0.19 ± 0.10
<i>Bz</i>	0.49 ± 0.07	-0.24 ± 0.06	-0.29 ± 0.06	-0.49 ± 0.09	-0.56 ± 0.13	-0.61 ± 0.17	-0.28 ± 0.10
<i>By</i>	0.12 ± 0.08	-0.67 ± 0.05	-0.67 ± 0.04	-0.60 ± 0.08	-0.55 ± 0.13	-0.54 ± 0.18	-0.49 ± 0.09
<i>B</i>	0.14 ± 0.08	-0.68 ± 0.04	-0.70 ± 0.04	-0.63 ± 0.08	-0.58 ± 0.12	-0.56 ± 0.17	-0.50 ± 0.09
<i>Ey</i>	-0.45 ± 0.07	0.02 ± 0.06	0.25 ± 0.06	0.44 ± 0.09	0.52 ± 0.13	0.58 ± 0.17	0.23 ± 0.10
<i>N</i>	-0.15 ± 0.08	-0.29 ± 0.06	-0.24 ± 0.06	0.02 ± 0.10	0.07 ± 0.15	0.18 ± 0.21	-0.07 ± 0.11
<i>V</i>	0.03 ± 0.08	-0.65 ± 0.05	-0.64 ± 0.05	-0.51 ± 0.09	-0.45 ± 0.14	-0.39 ± 0.2	-0.44 ± 0.10
<i>P</i>	-0.03 ± 0.08	-0.42 ± 0.06	-0.40 ± 0.06	-0.20 ± 0.10	-0.16 ± 0.15	-0.06 ± 0.21	-0.21 ± 0.11

3.4. Корреляция между модельными и наблюдательными значениями

В таблице 4 приведены коэффициенты корреляции между модельными $\Delta R_{\text{эф}}$ и наблюдательными $\Delta R_{\text{сгс}}$ значениями вариаций геомагнитных порогов, полученными для различных станций во время всех трех фаз бури. Из таблицы 4 видно, что на предварительном этапе бури обнаружилось очень низкие коэффициенты корреляции между $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ для всех станций кроме Алматы. Анализ таблицы 1 показал, что модельные вариации жесткостей обрезания показывают существенную корреляцию с параметрами магнитосферы, в то время как наблюдательные жесткости не обнаруживают к ним практически никакой чувствительности. Отсюда можно заключить, что модель *Ts01*, которая использовалась для вычисления $\Delta R_{\text{эф}}$, неадекватно предсказывает динамику магнитного поля в этот период рассматриваемой бури. Этот результат представляется ожидаемым, так как модель *Ts01* была разработана для сильно возмущенных условий в магнитосфере, которые еще не достигаются перед бурей.

Для двух других фаз бури, главной и восстановительной, коэффициент корреляций между ре-

зультатами, полученными наблюдательным и модельным способами достигает высоких значений. Корреляция особенно высока 0.91–0.97 для главной фазы.

Таблица 4 свидетельствует о том, что согласованность результатов, полученных модельным и наблюдательным методами практически одинакова для всех станций. Только высокий коэффициент корреляции двух методов на ст. Алматы на предварительной фазе выбивается из этой тенденции.

Можно заключить, что модель *Ts01* хорошо описывает возмущенное состояния магнитосферы во время главной и восстановительной фаз су-пербури в ноябре 2003 г.

3.5. Гистерезис

Как видно из таблиц 1–3, результаты корреляционного анализа для различных станций достаточно однородны. Для иллюстрации взаимосвязи между жесткостями обрезания и параметрами гелио- и магнитосферы на рис. 2 приведены диаграммы зависимости $\Delta R_{\text{эф}}$ на ст. Москва от исследуемых параметров в течение всех трех фаз бури.

Таблица 2. Корреляция $\Delta R_{\text{эф}}$ с параметрами гелио- и магнитосферы для главной фазы бури 20 ноября 2003 г.

$\Delta R_{\text{эф}}$	Станции						
	Токио	Алматы	Рим	Иркутск	Москва	Хобарт	средние
парам.							
<i>Dst</i>	0.99 ± 0.03	0.99 ± 0.04	0.98 ± 0.08	0.99 ± 0.06	0.99 ± 0.07	0.97 ± 0.08	0.99 ± 0.06
<i>Kp</i>	-0.77 ± 0.15	-0.78 ± 0.23	-0.84 ± 0.21	-0.81 ± 0.29	-0.83 ± 0.27	-0.78 ± 0.20	-0.80 ± 0.23
<i>Bz</i>	0.16 ± 0.24	0.14 ± 0.36	0.30 ± 0.37	0.20 ± 0.49	0.24 ± 0.47	0.29 ± 0.31	0.22 ± 0.37
<i>By</i>	0.97 ± 0.06	0.97 ± 0.08	0.96 ± 0.10	0.98 ± 0.11	0.97 ± 0.12	0.93 ± 0.12	0.96 ± 0.10
<i>B</i>	0.63 ± 0.19	0.65 ± 0.27	0.53 ± 0.33	0.61 ± 0.40	0.58 ± 0.39	0.51 ± 0.28	0.59 ± 0.31
<i>Ey</i>	-0.05 ± 0.24	-0.03 ± 0.36	-0.19 ± 0.38	-0.09 ± 0.50	-0.13 ± 0.48	-0.18 ± 0.32	-0.11 ± 0.38
<i>N</i>	-0.81 ± 0.14	-0.84 ± 0.20	-0.76 ± 0.25	-0.81 ± 0.3	-0.80 ± 0.29	-0.78 ± 0.20	-0.80 ± 0.23
<i>V</i>	0.94 ± 0.08	0.92 ± 0.14	0.95 ± 0.12	0.94 ± 0.17	0.95 ± 0.15	0.91 ± 0.14	0.94 ± 0.13
<i>P</i>	-0.77 ± 0.15	-0.82 ± 0.21	-0.72 ± 0.27	-0.77 ± 0.32	-0.76 ± 0.32	-0.75 ± 0.21	-0.77 ± 0.25
$\Delta R_{\text{сгс}}$							
парам.							
<i>Dst</i>	0.96 ± 0.13	0.95 ± 0.14	0.96 ± 0.14	0.99 ± 0.14	0.87 ± 0.26	0.86 ± 0.11	0.93 ± 0.15
<i>Kp</i>	-0.63 ± 0.35	-0.71 ± 0.34	-0.72 ± 0.34	-0.79 ± 0.33	-0.82 ± 0.30	-0.76 ± 0.14	-0.74 ± 0.30
<i>Bz</i>	-0.06 ± 0.46	-0.08 ± 0.48	0.07 ± 0.48	0.12 ± 0.53	0.37 ± 0.49	0.33 ± 0.20	0.13 ± 0.44
<i>By</i>	0.94 ± 0.16	0.96 ± 0.14	0.96 ± 0.13	0.96 ± 0.15	0.86 ± 0.27	0.85 ± 0.11	0.92 ± 0.16
<i>B</i>	0.77 ± 0.29	0.79 ± 0.30	0.79 ± 0.30	0.65 ± 0.41	0.40 ± 0.48	0.43 ± 0.19	0.64 ± 0.33
<i>Ey</i>	0.16 ± 0.45	0.19 ± 0.48	0.18 ± 0.48	-0.01 ± 0.53	-0.26 ± 0.51	-0.23 ± 0.21	0.01 ± 0.44
<i>N</i>	-0.78 ± 0.29	-0.83 ± 0.27	-0.84 ± 0.26	-0.89 ± 0.24	-0.83 ± 0.29	-0.80 ± 0.13	-0.83 ± 0.25
<i>V</i>	0.83 ± 0.26	0.92 ± 0.19	0.93 ± 0.18	0.94 ± 0.18	0.87 ± 0.26	0.80 ± 0.13	0.88 ± 0.20
<i>P</i>	-0.77 ± 0.29	-0.78 ± 0.3	-0.79 ± 0.30	-0.86 ± 0.28	-0.81 ± 0.31	-0.81 ± 0.13	-0.80 ± 0.27

Аналогичные диаграммы для $\Delta R_{\text{сгс}}$ (не показаны здесь) демонстрируют похожую картину, что вполне ожидаемо, так как для Москвы коэффициент корреляции между $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ на основных фазах развития бури очень высок (табл. 4).

Рисунок 2 позволяет проследить зависимость ΔR не только от варьируемого аргумента – параметров геомагнитной активности и межпланетной среды, но и от направления изменения аргумента. Рассмотрим панель связи $\Delta R - Dst$ (рис. 2а). Видно, что в главной фазе по мере развития бури (развитие кольцевого тока) с увеличением отрицательного значения *Dst* до -473 нТл происходит падение $\Delta R_{\text{эф}}$ до минимального значения -1.8 ГВ. На фазе восстановления (распад кольцевого тока) с изменением направления аргумента *Dst*, т.е. с уменьшением отрицательного значения *Dst*, падение $\Delta R_{\text{эф}}$ уменьшается и в конце фазы приближается к значениям, которые были на предварительной фазе бури. Траектория изменения значений $\Delta R_{\text{эф}}$ (*Dst*) на восстановительной фазе не совпадает с траекториями на предварительной и главной фазах, однако кривые лежат достаточно близко друг от друга. Полученная зависимость $\Delta R_{\text{эф}}$ от *Dst* неоднозначна, она имеет петлеобразную форму. Следовательно взаимосвязь $\Delta R_{\text{эф}}$ и

Dst-индекса геомагнитной активности обнаруживает признаки гистерезиса с характерной узкой петлей гистерезиса.

Петлеобразная диаграмма, петля гистерезиса, возникает как отклик ΔR также и на циклические изменения других параметров (рис. 2б–2и). Видно, что геометрия найденных петель гистерезиса различна для различных параметров, в частности петли различаются по ширине. Узкие петли характерны для связи ΔR с параметрами геомагнитной активности (рис. 2а и 2б). Широкие петли наблюдаются для связи ΔR со всеми параметрами ММП (рис. 2в–2е). Заметим, что кривые как узких, так и широких петель гистерезиса (рис. 2а–2е) показывают регулярное поведение – более или менее монотонное изменение ΔR в зависимости от аргумента в течение эволюции бури. Совершенно другое поведение демонстрируют петли гистерезиса на рис. 2з и 2и, показывающие связь ΔR с динамическими параметрами СВ – плотностью *N* и давлением *P*. Траектории $\Delta R(N)$ и $\Delta R(P)$ являются запутанными, кривые многократно пересекают друг друга, что может быть связано с резкими скачками и частыми изменениями *N* и *P* во времени на всех фазах бури (рис. 1). Петля гистерезиса для *V* по характеру геометрии

Таблица 3. Корреляция $\Delta R_{\text{эф}}$ с параметрами гелио- и магнитосферы для фазы восстановления бури 21 ноября 2003 г.

$\Delta R_{\text{эф}}$	Станции						
парам	Токио	Алматы	Рим	Иркутск	Москва	Хобарт	средние
<i>Dst</i>	0.99 ± 0.03	0.98 ± 0.05	0.99 ± 0.06	0.98 ± 0.07	0.99 ± 0.07	0.98 ± 0.07	0.96 ± 0.06
<i>Kp</i>	-0.90 ± 0.09	-0.86 ± 0.15	-0.86 ± 0.17	-0.85 ± 0.19	-0.86 ± 0.23	-0.91 ± 0.16	-0.87 ± 0.17
<i>Bz</i>	0.65 ± 0.16	0.67 ± 0.21	0.68 ± 0.24	0.70 ± 0.26	0.69 ± 0.32	0.65 ± 0.28	0.67 ± 0.25
<i>By</i>	0.65 ± 0.16	0.68 ± 0.21	0.70 ± 0.24	0.70 ± 0.26	0.70 ± 0.32	0.63 ± 0.29	0.67 ± 0.25
<i>B</i>	-0.93 ± 0.08	-0.93 ± 0.10	-0.94 ± 0.11	-0.94 ± 0.13	-0.94 ± 0.06	-0.91 ± 0.16	-0.93 ± 0.11
<i>Ey</i>	-0.67 ± 0.16	-0.68 ± 0.21	-0.69 ± 0.24	-0.72 ± 0.25	-0.70 ± 0.32	-0.67 ± 0.28	-0.69 ± 0.25
<i>N</i>	-0.77 ± 0.14	-0.75 ± 0.19	-0.75 ± 0.22	-0.74 ± 0.24	-0.76 ± 0.29	-0.75 ± 0.25	-0.75 ± 0.22
<i>V</i>	-0.71 ± 0.15	-0.66 ± 0.21	-0.64 ± 0.25	-0.64 ± 0.28	-0.65 ± 0.34	-0.74 ± 0.25	-0.67 ± 0.22
<i>P</i>	-0.80 ± 0.13	-0.78 ± 0.18	-0.79 ± 0.20	-0.78 ± 0.23	-0.80 ± 0.27	-0.78 ± 0.24	-0.79 ± 0.21
$\Delta R_{\text{сгс}}$							
парам	Токио	Алматы	Рим	Иркутск	Москва	Хобарт	средние
<i>Dst</i>	0.57 ± 0.24	0.88 ± 0.15	0.89 ± 0.14	0.94 ± 0.15	0.88 ± 0.21	0.93 ± 0.08	0.85 ± 0.16
<i>Kp</i>	-0.68 ± 0.22	-0.80 ± 0.19	-0.80 ± 0.19	-0.75 ± 0.28	-0.66 ± 0.32	-0.87 ± 0.11	-0.76 ± 0.22
<i>Bz</i>	0.34 ± 0.28	0.61 ± 0.25	0.62 ± 0.25	0.64 ± 0.33	0.56 ± 0.35	0.46 ± 0.19	0.54 ± 0.28
<i>By</i>	0.31 ± 0.28	0.61 ± 0.25	0.63 ± 0.25	0.70 ± 0.30	0.68 ± 0.31	0.55 ± 0.18	0.58 ± 0.26
<i>B</i>	-0.64 ± 0.23	-0.90 ± 0.14	-0.91 ± 0.13	-0.94 ± 0.15	-0.87 ± 0.20	-0.91 ± 0.09	-0.86 ± 0.16
<i>Ey</i>	-0.34 ± 0.28	-0.62 ± 0.24	-0.63 ± 0.25	-0.65 ± 0.32	-0.57 ± 0.35	-0.47 ± 0.19	-0.55 ± 0.27
<i>N</i>	-0.69 ± 0.22	-0.82 ± 0.18	-0.83 ± 0.18	-0.78 ± 0.26	-0.68 ± 0.31	-0.79 ± 0.13	-0.77 ± 0.21
<i>V</i>	-0.46 ± 0.26	-0.54 ± 0.26	-0.54 ± 0.27	-0.49 ± 0.37	-0.43 ± 0.39	-0.66 ± 0.16	-0.52 ± 0.29
<i>P</i>	-0.65 ± 0.23	-0.84 ± 0.17	-0.85 ± 0.17	-0.82 ± 0.24	-0.71 ± 0.30	-0.79 ± 0.13	-0.78 ± 0.21

Таблица 4. Коэффициент корреляции K между $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ во время трех фаз бури

	Токио	Алматы	Рим	Иркутск	Москва	Хобарт	Средние
Предвар.	0.22 ± 0.08	0.74 ± 0.04	0.15 ± 0.06	0.07 ± 0.10	-0.07 ± 0.15	-0.10 ± 0.21	0.17 ± 0.11
Главная	0.95 ± 0.08	0.93 ± 0.13	0.91 ± 0.16	0.97 ± 0.13	0.91 ± 0.20	0.92 ± 0.13	0.93 ± 0.14
Восстан.	0.57 ± 0.24	0.85 ± 0.16	0.88 ± 0.15	0.94 ± 0.15	0.87 ± 0.21	0.90 ± 0.09	0.84 ± 0.17

находится между параметрами ММП и параметрами СВ N и P .

Следует отметить, что петли гистерезиса для $\Delta R(Dst)$, $\Delta R(Kp)$, $\Delta R(By)$, $\Delta R(B)$, $\Delta R(Ey)$ и $\Delta R(V)$ проходят цикл по часовой стрелке, а $\Delta R(Bz)$ — против. Для петли гистерезиса “по часовой стрелке” при фиксированном значении ΔR значение аргумента на главной фазе больше, чем на восстановительной. Для петли гистерезиса “против часовой стрелки” величина аргумента на главной фазе меньше, чем на восстановительной.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты (табл. 1–4, рис. 2) свидетельствуют о том, что зависимость изменений модельных и наблюдательных жесткостей

обрезания КЛ от геомагнитной активности и параметров межпланетной среды различна на различных этапах развития магнитной бури 20–21 ноября 2003 г. При этом меняются не только значения коэффициента корреляции, но и знак. В частности, корреляция ΔR с полным межпланетным магнитным полем B и скоростью СВ V положительна на главной фазе и отрицательна на предварительной и восстановительной фазах, корреляция с Bz и By отрицательна на предварительной фазе и положительна на двух других.

На всех этапах бури вариации жесткости обрезания наиболее тесно коррелируют с геомагнитной активностью. При этом наивысшие коэффициенты k получаются для Dst -индекса, и несколько меньшие для Kp . Разница в чувствительности геомагнитных порогов к Dst и Kp может объяс-

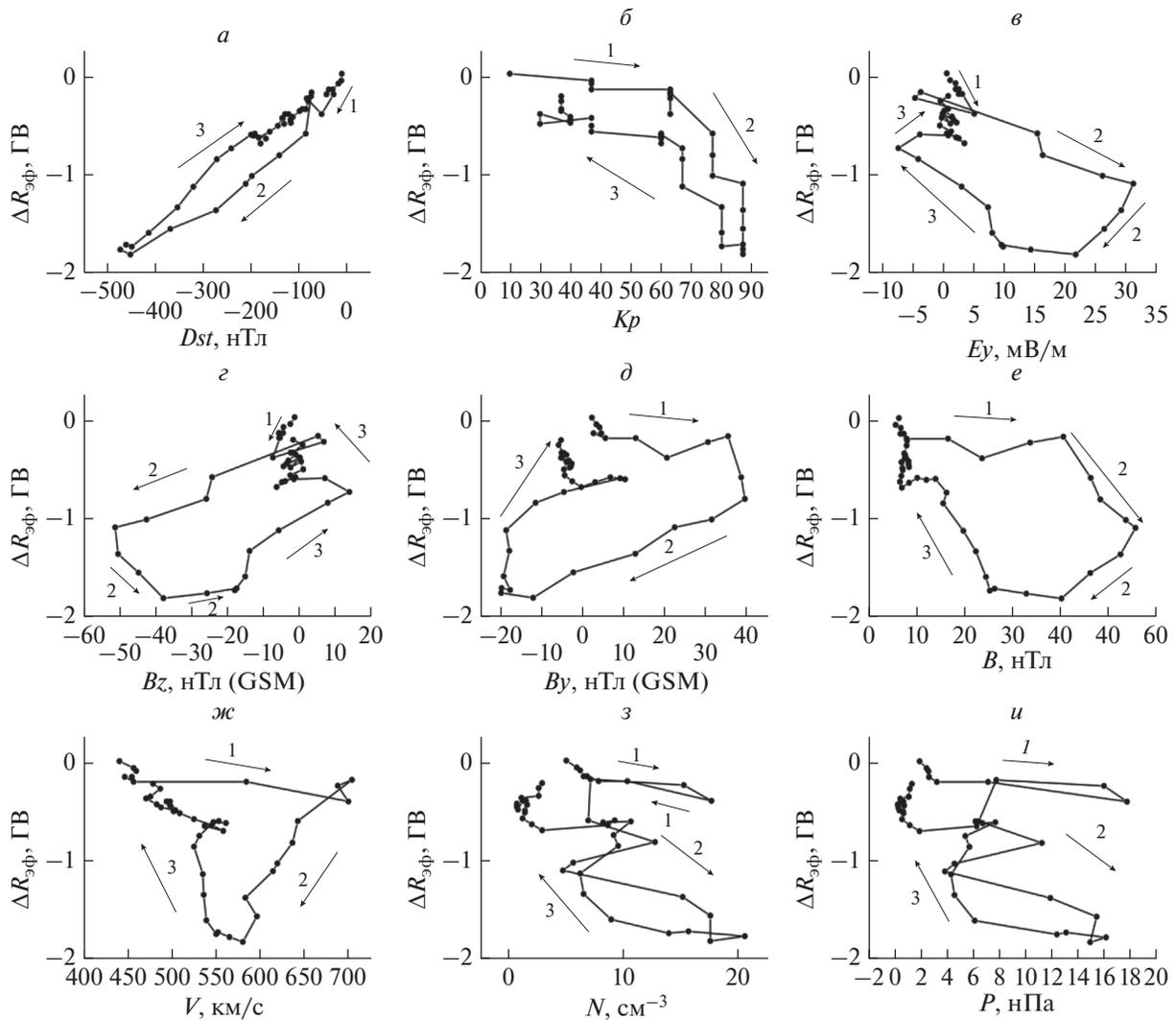


Рис. 2. Петли гистерезиса при взаимодействии $\Delta R_{эфф}$ на станции Москва с параметрами СВ, ММП и геомагнитной активности для трех фаз бури 20 ноября 2003 г.: (1) – предварительная, (2) – главная, (3) – восстановительная. Стрелками указано направление течения времени при развитии бури.

няться тем, что эти индексы отражают поведение различных токовых систем. Dst – определяется по вариациям наземного магнитного поля на низкоширотных станциях и отражает эффект экваториального кольцевого тока. Kp – определяется по среднеширотным станциям. Однако, во время сильного магнитного возмущения, когда авральный овал смещается к югу, эти среднеширотные станции начинают фиксировать эффекты высокоширотных токов. Наши результаты о преимущественной корреляции ΔR с Dst свидетельствуют о том, что вариации геомагнитных порогов во время исследуемой очень интенсивной бури контролируются в основном кольцевым током. Однако значительная корреляция с Kp позволяет предположить также заметный вклад высокоширотных токовых систем. Это согласуется с

результатами работы [Rich and Ejiri, 2005], обнаружившими смещение высокоширотных токов до $40^\circ N$ во время этой бури.

Во время исследуемой бури параметром межпланетной среды, который наиболее сильно влияет на жесткости обрезания, является B_u -компонента ММП, коэффициент корреляции с которой доходит во время главной фазы на ст. Иркутск до 0.98 ± 0.11 для $\Delta R_{эфф}$ и 0.96 ± 0.15 для $\Delta R_{срс}$. Корреляция ΔR с B_z -компонентой на главном и предварительном этапах была очень низкой, и только на восстановительной фазе k было достаточно значительным (средние значения 0.67 ± 0.25 для $\Delta R_{эфф}$ и 0.54 ± 0.28 для $\Delta R_{срс}$).

Сравним полученные результаты корреляций для исследуемой бури и для бури 7–8 ноября 2004 г. [Птицына и др., 2020]. Единственной об-

шей чертой бурь является значительный контроль ΔR со стороны Dst . Связь с динамическими параметрами СВ хотя и четко прослеживается, однако достаточно неожиданно на главной фазе исследуемой бури корреляция с V положительна, а для бури 2004 г. она отрицательна. Кроме того, направление корреляции ΔR с N , P для этих бурь также прямо противоположно. Важнейшим различием этих возмущений является и тот факт, что на главной фазе бури 20 ноября корреляция V_y -компоненты ММП и ΔR была очень высока, в то время как для бури 2004 г. связь со всеми компонентами магнитного поля практически отсутствовала. Только на фазе восстановления влияние динамических и магнитных параметров для этих бурь становится несколько более похожим.

Связь индексов геомагнитной активности с параметрами СВ и ММП исследовалась в многочисленных работах [Dungey, 1961; Burton et al., 1975; Newel et al., 2007; Borovsky, 2014; Borovsky and Birn, 2014; и ссылки в них], в том числе и для периодов магнитных бурь. Было установлено, что одним из самых геоэффективных параметров ММП является его южная компонента $B_z < 0$, рост которой вызывает пересоединение магнитного поля солнечного ветра и поля магнитосферы. Однако V_y -компонента тоже может оказывать значительное влияние на пересоединение и конвекцию в магнитосфере [Crooker, 1979; Daglis et al., 1999; Gosling et al., 1985; Rawat et al., 2007]. В частности, в работе [Rawat et al., 2007] найдено, что V_y -компонента ММП играет существенную роль в развитии интенсивной главной фазы в присутствии южной компоненты B_z . При этом конфигурация ММП, при которой $V_y > 0$, а $B_z < 0$ увеличивает интенсивность бури. Именно такая конфигурация ММП наблюдалась 20 ноября 2003 г. во время главной фазы бури (рис. 1). В течение ~ 7 ч после прихода SSC фиксировалась положительная V_y -компонента с необыкновенно большой амплитудой (~ 40 нТл), которая сопровождалась сильной отрицательной B_z -компонентой (~ -50 нТл). Это привело к развитию интенсивного Dst .

В литературе отмечалось, что V_y -компонента вносит значительный вклад в пересоединение дневной магнитосферы [Park et al., 2006] и ведет к асимметрии полусфер. Наш результат о существенном влиянии V_y -компоненты на жесткости обрезания в главной фазе согласуется с результатами работы [Данилова и др., 2019]. В этой работе найдена северо-южная и западно-восточная асимметрии распределения жесткостей обрезания КЛ по земной поверхности в главной фазе бури 20 ноября 2003 г.

Многими авторами было установлено, что одним из самых геоэффективных параметров СВ является азимутальное электрическое поле $E_y =$

$= -VB_z$, где V – радиальная скорость СВ [напр., Burton et al., 1979 и ссылки там]. Проведенное исследование показало, что в данном случае связь с E_y отсутствует для предварительной и главной фазы, но в фазе восстановления она становится достаточно существенной. Такой результат, по-видимому, можно соотнести с выводами, полученными авторами работы [Borovsky and Birn, 2014], которые утверждают, что E_y -компонента СВ не является физическим фактором, отвечающим за пересоединение на дневной стороне магнитосферы. С их точки зрения, корреляция E_y с геомагнитными индексами, полученная ранее, является скорее совпадением. Однако проникновение электрического поля СВ вдоль магнитных силовых линий уже после пересоединения, после того, как силовые линии СВ становятся связанными с земной полярной шапкой, может стать важным фактором контроля геомагнитных токовых систем на более поздних этапах развития бури [Goertz et al., 1993; Ridley, 2007; Borovsky, 2013].

Отдельного обсуждения заслуживают наши результаты о корреляции между жесткостями обрезания КЛ на ст. Москва и параметрами ММП и геомагнитной активности, которое обнаружило признаки гистерезиса (параграф 3.5). Эти признаки заключаются в том, что взаимосвязь ΔR и параметров магнитосферы зависит от направления изменения этих параметров: траектория изменения ΔR в зависимости от исследуемых параметров во время развития токовых систем не совпадает с траекториями во время распада токовых систем. В результате возникает петлеобразная диаграмма – петля гистерезиса.

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.

Вопрос о том, какая токовая система вносит преимущественный вклад в корреляционные соотношения между ΔR и исследуемыми параметрами в каждом конкретном периоде бури, требует дальнейших исследований. В качестве примера анализа характерных особенностей петель гистерезиса рассмотрим траекторию связи значений $\Delta R_{\text{эф}}$ с B_z в главной фазе бури (рис. 2г). 20 ноября, отрицательное значение B_z , начиная с первого

часа главной фазы, растет до 15:00 UT, достигая в это время минимума -50.9 нТл, после чего начинает уменьшаться. С начала главной фазы растет также и $|\Delta R|$ в прямой корреляции с ростом $|B_z|$, достигает минимума -1.81 ГВ в 18:00 UT, с запаздыванием в три часа по отношению к B_z , после чего, в соответствии с уменьшением отрицательного B_z , начинается уменьшение падения ΔR , которое продолжается и далее на восстановительной фазе. Данные космических аппаратов DMSP, NOAA, и LANL позволили выявить характерные черты этой супербури [Ebihara et al., 2005]. В частности, было найдено, что граница полярной шапки с наступлением главной фазы начала смещаться к югу, достигла в $\sim 16:00$ UT 20 ноября необычно глубокого минимума (60°), а затем широта начала вновь увеличиваться. Установлено, что во время главной фазы этой бури расширение границы полярной шапки и связанной с ней области проникновения частиц КЛ в магнитосферу контролировалось продольными токами [Ebihara et al., 2005]. Таким образом, во время главной фазы происходило практически параллельное циклическое расширение—сужение области проникновения КЛ в магнитосферу и развития связи $\Delta R_{\text{эф}}$ с B_z . Это позволяет предположить, что в главной фазе взаимосвязь $\Delta R_{\text{эф}}$ с B_z контролировалась продольными токами. Отметим, что поскольку во время одной части главной фазы бури между ΔR и B_z наблюдалась положительная корреляция, а во время другой части — отрицательная (рис. 2а), то общий k для всей фазы мал (табл. 2). Отсюда видно, что специфические изменения жесткостей в ответ на изменения параметров магнитосферы могут происходить на временных шкалах меньших, чем фаза бури.

Отмеченная выше драматическая разница в зависимости ΔR от B_y и B_z , V , N и P в процессе эволюции бурь 2003 и 2004 гг. является достаточно непредвиденным выводом. Дело в том, что обе эти бури имеют много общего, они принадлежат к одному классу очень сильных возмущений, обе произошли на спаде солнечного цикла, вблизи осеннего равноденствия в ноябре, и непосредственная их причина аналогична — это взаимодействие магнитосферы с магнитным облаком, содержащим очень высокую южную компоненту ММП [Ермолаев и др., 2005; Tsurutani et al., 2008]. Однако, несмотря на это, реализующийся сценарий контроля жесткостей обрезания КЛ абсолютно разный. Поскольку возмущенная магнитосфера представляет собой сложную многофакторную систему, плохо понятую в настоящее время, то для более конкретных выводов о влиянии этой системы на ΔR требуется гораздо больше статистического материала. В настоящее время нами проводится работа по созданию банка данных такого материала.

5. ВЫВОДЫ

В работе проведен анализ корреляций изменений жесткости геомагнитного обрезания КЛ с параметрами СВ, ММП и геомагнитной активности на всех этапах развития магнитной бури 20–21 ноября 2003 г. — перед началом бури, в ее главной и восстановительной фазах. Получены следующие конкретные результаты:

1. *Связь ΔR с эволюцией бури.* Зависимости изменений модельных и наблюдательных вариаций жесткостей обрезания ΔR от геомагнитной активности и параметров межпланетной среды существенно отличаются друг от друга на различных этапах развития магнитной бури 20–21 ноября 2003 г. При этом могут меняться не только значения коэффициента корреляции, но и знак. Есть указание на то, что отклик жесткостей обрезания на изменения параметров магнитосферы может происходить на временных масштабах меньших, чем фаза бури.

2. *Гистерезис.* Впервые, насколько нам известно, обнаружены явления гистерезиса во взаимосвязи изменений жесткостей обрезания КЛ и параметров гелио- и магнитосферы на масштабе магнитной бури (на примере ст. Москва). Петлеобразная диаграмма возникает из-за того, что траектория значений ΔR в зависимости от исследуемых параметров во время развития токовых систем не совпадает с траекторией во время спада токовых систем. Взаимосвязь ΔR с геомагнитными индексами Dst и Kp характеризовалась узкой петлей гистерезиса, а с параметрами ММП — широкой. Петли гистерезиса для плотности и давления солнечного ветра были неупорядоченными.

3. *Зависимость ΔR от геомагнитной активности.* Вариации жесткости обрезания ΔR наиболее тесно коррелируют с геомагнитной активностью. При этом наивысшие коэффициенты корреляции достигаются для Dst (на главной фазе средние 0.99 ± 0.06 для $\Delta R_{\text{эф}}$ и 0.93 ± 0.15 для $\Delta R_{\text{сгс}}$), и несколько меньшие коэффициенты для Kp .

4. *Зависимость ΔR от ММП.* Наибольшая корреляция достигалась с B_y -компонентой. Особенно высокий коэффициент корреляции k для наблюдательных и модельных вариаций жесткостей обрезания, $\Delta R_{\text{сгс}}/\Delta R_{\text{эф}}$, ($0.92 \pm 0.16/0.96 \pm 0.10$), получен для главной фазы. Для фазы восстановления наиболее значительной была антикорреляция $\Delta R_{\text{сгс}}/\Delta R_{\text{эф}}$ с общим полем B ($-0.86 \pm 0.16/-0.93 \pm 0.11$). Корреляция ΔR с B_z , а также с E_y во время предварительной и главной фаз была несущественной. Значимая связь с B_z и E_y появилась только во время фазы восстановления.

5. *Зависимость от динамических параметров СВ.* Во всех фазах бури фиксировалась значительная связь между ΔR и всеми динамическими парамет-

рами. Особенно высокие коэффициенты корреляции достигались между ΔR и скоростью СВ, причем для предварительной и восстановительной фаз наблюдалась антикорреляция, а для главной фазы — прямая корреляция.

Взаимосвязь вариаций геомагнитных порогов КЛ с параметрами геомагнитной активности и магнитосферы различна на разных фазах бури, поскольку она обусловлена динамикой глобальных токовых систем, которые в процессе эволюции магнитного возмущения развиваются и затухают различным образом и на разных временных интервалах. За счет асимметрии процессов интенсификации и затухания токовых систем, проникновение КЛ в магнитосферу обнаруживает явления гистерезиса, т.е. динамика жесткостей обрезания демонстрирует зависимость отклика от направления развития токовых систем. Определение однозначных зависимостей ΔR от конкретной токовой системы на каждом этапе бури требует дальнейших исследований. Накопление статистического материала о корреляционных соотношениях между вариациями жесткостей обрезания и параметрами СВ и геомагнитной активности во время разных этапов магнитных возмущений представляет актуальную задачу. Это важно не только для решения проблем физики магнитосферы, но также для учета последствий “плохой” космической погоды для космонавтики и для бурно развивающихся в последние полтора десятилетия высокоширотных авиаперевозок [Iucci et al., 2005; Буров и др., 2005; Kress et al., 2015].

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа частично выполнена в рамках базового финансирования программы Фундаментальных научных исследований П.16. Для получения $R_{\text{сгс}}$ использовалось оборудование Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckp-rg.ru/ckp/3056/>) и научной установки “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)”. Мы благодарим коллектив OMNI за предоставленную возможность использовать базу данных, созданную в рамках проекта GSFC/SPDF OMNIWeb (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>), а также анонимного рецензента за чрезвычайно полезные замечания и предложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

— Буров В.А., Мелешков Ю.С., Очелков Ю.П. Методика оперативной оценки уровня радиационной опасности, обусловленной возмущениями космической погоды, при авиаперевозках // Гелиогеофиз. исслед. Вып. 7. С. 61–81. 2014.

— Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И., Базилевская Г.А. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре–ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 453–508. 2004.

— 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 возмущения, приведшие к сильной магнитной буре 20 ноября 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 1. С. 23–50. 2005.

— 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>

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

— Тясто М.И., Данилова О.А., Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Отражение параметров солнечного ветра в жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в период сильной магнитной бури в ноябре 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 6. С. 723–740. 2008.

— 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.

— Тясто М.И., Данилова О.А., Птицына Н.Г., Сдобнов В.Е. Вариации жесткостей обрезания космических лучей во время сильной геомагнитной бури в ноябре 2004 г. // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 2. С. 97–105. 2015.

— Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.N., Bellotti R. 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>

— Borovsky J.E. Physics based solar-wind driver functions for the magnetosphere: Combining the reconnection-coupled MHD generator with the viscous interaction // J. Geophys. Res. V. 118. Is. 11. P. 7119–7150. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50557>

— Borovsky J.E. Canonical correlation analysis of the combined solar–wind and geomagnetic–index data sets //

- J. Geophys. Res. V. 119. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019607>
- *Borovsky J.E., Birn J.* The solar wind electric field does not control the dayside reconnection rate // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 119. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019193>
- *Burton R.K., McPherron R.L., Russel C.J.* An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst* // J. Geophys. Res. V. 80. P. 4204–4214. 1975.
- *Crooker N.U.* Dayside merging and cusp geometry // J. Geophys. Res. V. 84. P. 951–959. 1979.
<https://doi.org/10.1029/JA084iA03p00951>
- *Daglis I.A., Thorne R. M., Baumjohann W., Orisini S.* The terrestrial ring current: Origin, formation, evolution, and decay // Rev. Geophysics. V. 37. P. 407–438. 1999.
- *Dvornikov V.E., Sdobnov V.E.* Variations in the rigidity spectrum and anisotropy cosmic rays at the period of Forbush effect on the 12–25 July 1982 // Intern. J. Geomagn. Aeron. V. 3. P. 217–223. 2002.
- *Dungey J.W.* Interplanetary magnetic field and the auroral zones // Phys. Rev. Lett. V. 6. P. 47–48. 1961.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47>
- *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>
- *Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V., Eroshenko E.A., Ptitsyna N.G., Villoresi G., Chizhenkov G. V., Dorman L.I., Parisi M., Tyasto M.I., Yanke V.G.* Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // Space weather. V. 3. S01001. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2003SW000056>
- *Goertz C.K., Shan L.-H., Smith R.A.* Prediction of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 98. (A5). P. 7673–7684. 1993.
- *Gosling J.T., Bake D.N., Bame S.J., Feldman W.C., Zwickl R.D., Smith E.J.* North–south and dawn–dusk plasma asymmetries in the distant tail lobes. ISEE 3 // J. Geophys. Res. V. 90. P. 6354–6360. 1985.
<https://doi.org/10.1029/JA090iA07p06354>
- *Kane R.P.* Hysteresis loops of Cosmic Ray intensity decreases versus solar and interplanetary parameters // Ann. Geophysicae V. 25. Iss 9. 2007.
<https://doi.org/10.5194/angeo-25-2087-2007>
- *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.–Space. 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.
- *Kress B.T., Hudson M.K., Selesnick R.S., Mertens C.J., Engel M.* Modeling geomagnetic cutoffs for space weather applications // J. Geophys. Res.–Space. V. 120. № 7. P. 5694–5702. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020899>
- *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.
- *Newel P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J.* A nearly universal solar wind–magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables // J. Geophys. Res. V. 112. A01206. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2006JA012015>
- *Park K.S., Ogino T., Walke R.J.* On the importance of antiparallel reconnection when the dipole tilt and IMF *By* are nonzero // J. Geophys. Res. V. 111. A05202. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010972>
- *Rawat R., Alex S., Lakhina G.S.* Geomagnetic storm characteristics under varied interplanetary conditions // Bull. Astr. Soc. India. V. 35. P. 499–509. 2007.
- *Rich F.J., Ejiri M.* Ring current and the magnetosphere–ionosphere coupling during the superstorm of 20 November 2003 // J. Geophys. Res. V. 110. Iss. A9. P. 1–16. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010924>
- *Ridley A.J.* Alfvén wings at Earth’s magnetosphere under strong interplanetary magnetic fields // Ann. Geophys. V. 25. 533–542. 2007.
- *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. 2002a.
<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. V. 107. A8. 1176–1192. 2002b.
- *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. V. 120. P. 553–563. 2014.
- *Tyasto M.I., Danilova O.A., Ptitsyna N.G., Sdobnov V.E.* Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the great geomagnetic storm of November 2004 // Adv. Space Res. V. 51. P. 1230–1237. 2013.