УДК 523-62;523.9

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ВАРИАЦИИ ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ

© 2019 г. Н. Г. Птицына^{1, *}, О. А. Данилова¹, М. И. Тясто¹, В. Е. Сдобнов²

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (СПбФ ИЗМИРАН), г. Санкт-Петербург, Россия ²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (ИСЗФ СО РАН), г. Иркутск, Россия *e-mail: nataliaptitsyna@ya.ru Поступила в редакцию 14.12.2018 г. После доработки 08.01.2019 г. Принята к публикации 23.05.2019 г.

Рассчитана корреляция вариаций жесткостей геомагнитного обрезания ΔR с межпланетными параметрами и *Dst*-индексом геомагнитной активности во время шести сильных и одной умеренной бури 23-го и 24-го солнечных циклов. Значения ΔR вычислялись с использованием двух методов: (1) метода спектрографической глобальной съемки, при котором определение жесткостей обрезания $R_{\rm crc}$ базируется на наблюдательных данных сети нейтронных мониторов и (2) метода, при котором для определения жесткостей обрезания $R_{\rm sph}$ численно рассчитываются траектории частиц в модельном магнитном поле магнитосферы. В целом результаты, полученные двумя методами, хорошо согласуются между собой. Наибольшее влияние на ΔR оказывает *Dst*-индекс геомагнитной активности. При этом корреляция увеличивается с ростом интенсивности бури. Чувствительность ΔR к межпланетным параметрам сильно отличается для разных бурь. Наиболее геоэффективным межпланетным параметром оказалась скорость солнечного ветра *V*. Существенная антикорреляция ΔR и *V* прослеживается почти для всех бурь. Корреляция $\Delta R_{\rm crc}$ с *Bz* -компонентой межпланетного магнитного поля наблюдается только для двух бурь, 7–14.11.2003 г. и 7–8.11.2004 г., для которых абсолютная величина *Bz* достигала очень высоких значений (\approx -50 нТл). В то же время довольно высокая корреляция $\Delta R_{\rm sph}$ с *Bz* была получена для большинства бурь. Азимутальная компонента межпланетного поля *By* и динамическое давление солнечного ветра *P* практически не обнаруживают связи с ΔR .

DOI: 10.1134/S0016794019050092

1. ВВЕДЕНИЕ

Приход космических лучей (КЛ) в определенную точку земной поверхности регулируется конфигурацией и интенсивностью магнитного поля Земли, которое исполняет роль экрана для заряженных частиц. Геомагнитное поле разрешает или запрещает приход частиц КЛ в данную точку в магнитосфере и атмосфере в зависимости от их энергии. Самая низкая широта, до которой энергичные частицы могут проникать, известна как широта обрезания. Эта широта является функцией жесткости обрезания (момент на единицу заряда). Жесткость геомагнитного обрезания (ЖГО), по определению, - это пороговая жесткость, ниже которой поток частиц равен нулю из-за геомагнитного экранирования. Свойства магнитного экрана сильно меняются во времени в зависимости от динамического взаимодействия магнитных

и электрических полей солнечного ветра с внутримагнитосферными полями и токами.

Особенно значительные изменения в токах, плазме и магнитном поле магнитосферы происходят во время геомагнитной бури [Leske et al., 2001]. Энергию солнечного ветра (CB) в магнитосферу Земли передают выбросы корональной солнечной массы или высокоскоростные коротирующие области возмущений из корональных дыр. Наиболее сильные геомагнитные бури вызываются преимущественно транзиентными событиями — корональными выбросами массы и связанными с ними магнитными облаками.

Определение вариаций жесткостей обрезания КЛ и их зависимости от параметров СВ и межпланетного магнитного поля ММП, а также от геомагнитной активности рассматривалось в ряде работ на основе различных экспериментальных и теоретических подходов с использованием прямых наблюдений заряженных частиц на космических аппаратах или путем численного моделирования.

В работе [Kanekal et al., 1998] на основе данных измерений на космическом аппарате (KA) SAMPEX установлено, что ЖГО высокоширотных энергичных частиц связаны с Вг-компонентой ММП и со скоростью СВ. Автор работы [Shimazu, 2009] рассмотрел траекторию движения солнечных протонов в рамках магнитогидродинамического (МГД) подхода и пришел к выводу, что проникновение частиц на расстояние четырех земных радиусов *Re*, (куда частицы не проникали в спокойное время) обусловлено ростом давления солнечного ветра во время бури. Большинство этих протонов проникали в магнитосферу тогда, когда абсолютная величина южной компоненты ММП *Вz* была мала или она даже была положительной. В работе [Shimazu et al., 2006] магнитодинамическое рассмотрение движения протонов показало, что ЖГО частиц с энергией 1 МэВ уменьшаются, когда компонента B_{Z} становится отрицательной, тогда как ЖГО протонов с энергией 10 МэВ практически не зависят от Bz. В работе [Tyssøy and Stadsnes, 2014] получена хорошая связь широты обрезания с давлением солнечного ветра. При этом корреляция с давлением была отрицательной.

Авторы работы [Adriani et al., 2016] в рамках эксперимента на КА РАМЕLА измерили вариации жестокостей обрезания высокоэнергичных протонов во время бури в декабре 2006 г. Проведена корреляция вариаций измеренных ЖГО с параметрами СВ и ММП. Наибольшая корреляция (отрицательная) широт обрезания получена с общим магнитным полем B, с Bz, а также со скоростью V (тоже отрицательная). Ни динамическое давление P, ни плотность N солнечного ветра не показали значимой корреляции на временном масштабе всей бури. И только для главной фазы бури получена высокая положительная корреляция широт обрезания с давлением.

В ряде работ исследовалась корреляция вариации ЖГО с геомагнитной активностью. Чаще всего характеристикой геомагнитной активности служил Dst-индекс, который является показателем буревой возмущенности и развития кольцевого тока. В работе [Tyssøy and Stadsnes, 2014] обнаружено, что для бури 2006 г. вариации ЖГО достаточно хорошо коррелируют с Dst. При этом коэффициенты корреляции уменьшаются тогда, когда Dst мало́ по абсолютной величине или становится положительным. В работе [Adriani et al., 2016] получена высокая корреляция с геомагнитным индексом *Кр* и несколько меньшая – с *Dst*. Согласно [Adriani et al., 2016] наиболее сильная корреляция с Dst наблюдается во время фазы восстановления бури. В работе [Tyasto et al., 2013] найдено, что для бури в ноябре 2004 г. наибольшая корреляция вариаций ЖГО с *Dst* наблюдается во время главной фазы бури – в ее максимуме (минимум *Dst*). С другой стороны, в работах [Kress et al., 2010; Belov et al., 2005] получено, что наибольшая корреляция вариаций ЖГО с *Dst* для бури 2003 г. наблюдается не в главной фазе, а за 10 ч до ее наступления.

Таким образом, результаты исследования зависимости ЖГО от межпланетных параметров и геомагнитной активности достаточно противоречивы. Необходимы дальнейшие работы в этой области, которые смогут прояснить динамику геомагнитного экрана для разных условий в гелиосфере и магнитосфере. Кроме того, знание вариаций жесткостей в зависимости от параметров солнечного ветра становится все более актуальным для безопасности космических аппаратов, их экипажей, а также для авиаперевозок (см., например, работы [Smart and Shea, 2003; Iucci et al., 2005; Kress et al., 2015 и ссылки в них]). Особенно важно исследование таких связей для периодов сильных возмущений.

Данная статья является продолжением наших работ, в которых рассматривалась чувствительность жесткостей обрезания (без учета знака корреляции) к различным компонентам ММП и параметрам СВ для отдельных интенсивных бурь [Тясто и др., 2008, 2011, 2015; Tvasto et al., 2013]. В данной работе мы провели совместный анализ корреляций изменений ЖГО в зависимости от межпланетных параметров для семи наиболее значительных магнитных бурь 23-го и 24-го циклов солнечной активности. При этом к уже рассмотренным нами ранее были добавлены бури, наблюдавшиеся в 1997, 2012 и 2015 гг. Корреляции в данной работе изучались более подробно, в частности, с учетом знака. Фокус работы переместился от исследования распределения вариаций ЖГО по отдельным станциям к рассмотрению усредненной глобальной картины.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

2.1. Данные о межпланетных и геомагнитных параметрах

В настоящей работе мы оценили связь вариаций жесткости геомагнитного обрезания ЖГО с изменениями плотности *N*, скорости *V* и динамического давления солнечного ветра *P*, с компонентами *Bz* и *By* межпланетного магнитного поля и *Dst*-индексом геомагнитной активности. Исследования проведены для следующих возмущенных периодов – магнитных бурь 23-го и 24-го циклов солнечной активности: 9–15 января 1997 г., 7–14 ноября 2003 г., 7–8 ноября 2004 г. (2004 I) и 9–13 ноября 2004 г. (2004 II), 15–19 мая 2005 г., 7– 11 марта 2012 г., 21–25 июня 2015 г. Данные о параметрах солнечного ветра и ММП взяты на сайте

Параметр	1997	2003	2004 I	2004 II	2005	2012	2015
<i>Dst</i> _{min} , нТл	-78	-472	-373	-289	-263	-143	-204
<i>Bz</i> _{min} , нТл	-14.9	-50.9	-44.9	-24.7	-24.7	-16.4	-26.3
<i>В</i> у _{тах} , нТл	13.9/-13.7	39.6/-19.8	38/-19.8	13.9/-30.7	34.1/-17.7	12.8/-18.2	25.6/-10.3
<i>V</i> _{max} , км/с	468	704	730	810	959	737	742
$N_{\rm max}$, см ⁻³	74.8	20.5	64.5	19.7	17.6	22.9	49.9
Кр	6.0	8.7	8.7	8.7	8.3	7.3	8.3
P _{max}	24.9	17.9	31.8	26.5	22.8	9.1	44.1

Таблица 1. Экстремальные значения межпланетных параметров и *Dst*-вариации в период исследуемых магнитных бурь

https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html, а данные мировой сети станций космических лучей на сайте http://www.nmdb.eu/.

В таблице 1 приведены максимальные значения параметров, наблюдавшихся во время исследуемых бурь. Все они были вызваны приходом к Земле корональных выбросов массы. Из таблицы 1 видно, что буря 9—15 января 1997 г. является умеренной, остальные шесть бурь являются очень сильными.

2.2. Методы исследования

Для расчетов жесткости геомагнитного обрезания были использованы два разных метода – метод спектрографической глобальной съемки (СГС) и метод прослеживания траекторий частиц космических лучей в модельном магнитном поле.

В основе метода СГС лежит рассмотрение процессов изменения энергии заряженных частиц в регулярных электромагнитных полях гелиосферы [Dvornikov et al., 2013]. Метод СГС дает возможность по наблюдениям на мировой сети станций получать информацию о распределении первичных КЛ по энергиям и питч-углам в ММП. Метод позволяет также судить об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений и использовать для анализа весь имеющийся комплекс наземной регистрирующей аппаратуры (мировую сеть нейтронных мониторов, расположенных на любых уровнях в атмосфере Земли, наземные и подземные мезонные телескопы и т.д.). Статистическая ошибка в определении $\Delta R_{\rm crc}$ с учетом статистической точности измерений на станциях космических лучей мировой сети не превышает по абсолютной величине 0.05 ГВ. Вариации ЖГО, полученные этим методом, далее будем считать "наблюдательными".

Метод прослеживания траекторий частиц КЛ в геомагнитном поле для определения ЖГО был разработан в работах [McCracken et al., 1962; Shea et al., 1965; Dorman et al., 1972]. Для расчета геомагнитных порогов необходимо задать магнитное поле, которое обычно описывается какой-либо моделью [Shea et al., 1965]. При этом точность определения геомагнитных порогов зависит от точности магнитосферной модели, используемой при расчетах. Мы использовали магнитосферную модель Ts01, которая построена по базе данных измерений магнитного поля на спутниках в период 37 геомагнитных бурь с $Dst \leq -65$ нТл [Tsvganenko, 2002a, b: Tsvganenko et al., 2003]. Для описания сильных бурь была разработана также модель Ts04 [Tsyganenko and Sitnov, 2005]. Однако наш анализ, проведенный в работах [Тясто и др., 2008; Tyasto et al., 2013], показал, что модель Ts01 лучше описывает магнитосферные возмущения во время больших бурь в ноябре 2003 и 2004 гг. В модели Ts01 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. Чтобы ограничить поле внутри магнитосферы, был включен блок, описывающий поле взаимодействия, которое представляет собой эффект проникновения межпланетного магнитного поля внутрь магнитосферы. Поле взаимодействия представлено в виде однородного магнитного поля, которое пропорционально поперечной компоненте и направлено вдоль нее. В качестве входных параметров, определяющих влияние межпланетных условий на магнитосферу, используются Dst-вариация, плотность и скорость СВ, а также компоненты ММП. Вариации ЖГО, полученные этим методом ($\Delta R_{\rm ab}$), в дальнейшем будем считать "модельными".

На первом этапе работы мы рассчитали геомагнитные пороги для КЛ двумя методами, описанными выше. Наблюдательные $\Delta R_{\rm crc}$ и модельные $\Delta R_{\rm эф}$ были рассчитаны для каждого часа в период вышеперечисленных бурь. Расчеты для первых пяти бурь (1997, 2003, 2004 I, 2004 II и 2005 гг.) проводились для следующих станций: Токио (35.75° N, 139.72° E), Алматы (43.20° N,

Станция	1997	2003	2004 I	2004 II	2005	2012	2015
Токио	0.02	0.81	0.76	0.05	0.25		
ESOI						0.51	0.54
Алматы	0.24	0.92	0.92	0.70	0.71	0.65	0.79
Рим	0.28	0.92	0.93	0.78	0.76	0.72	0.83
Иркутск	0.48	0.95	0.93	0.81	0.84	0.65	0.87
Москва	0.47	0.93	0.95	0.82	0.83	0.61	0.87
Хобарт	0.46	0.88	0.94	0.75	0.72		
Кингстон						0.41	0.87
Средние	0.32	0.90	0.90	0.64	0.68	0.59	0.80

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между $\Delta R_{\rm crc}$ и $\Delta R_{\rm sob}$

76.94° Е), Рим (41.90° N, 12.52° Е), Иркутск (52.47° N, 104.03° Е), Москва (55.47° N, 37.32° Е) и Хобарт (42.90° S, 147.33° Е). В расчетах для бурь 2012 и 2015 гг. в связи с закрытием станций Токио и Хобарт были использованы близкие по широте станции: обс. Emilio Segre в Израиле (ESOI) (33.30° N, 35.80° Е) и Кингстон (42.99° S, 147.29° Е). Пороговые жесткости всех станций в спокойное время охватывают область от ~10 до 2 ГВ. Изменения жесткости геомагнитного обрезания $\Delta R_{\rm sphere}$ и $\Delta R_{\rm crc}$ определялись, как разности между значениями жесткости обрезания, рассчитанными в рамках обоих методов, и жесткостями в спокойный период (до начала бури).

На втором этапе для каждой станции вычислялись коэффициенты корреляции k между $\Delta R_{\rm эф}$ и $\Delta R_{\rm crc}$ и параметрами солнечного ветра P, V, N, компонентами ММП Bz и By, а также Dst-индексом геомагнитной активности. Коэффициенты kбыли получены из анализа регрессионных уравнений по выборке наблюдений на всем протяжении бури. Анализ показал, что k на вышеперечисленных станциях мало отличаются друг от друга, и они не приводятся в данной статье.

На последнем этапе работы мы усреднили значения k по всем станциям, затем провели анализ и сравнение полученных средних значений k для наблюдательных и модельных ΔR .

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Корреляция наблюдательных и модельных вариаций ЖГО

Как уже упоминалось выше, на первом этапе работы были рассчитаны вариации ЖГО двумя методами. Поскольку $\Delta R_{\rm crc}$ и $\Delta R_{\rm эф}$ являются базой для дальнейших расчетов, мы проанализировали, насколько хорошо они коррелируют между собой. Мы рассчитали корреляцию наблюдательных $\Delta R_{\rm crc}$ и модельных $\Delta R_{\rm эф}$ для всех станций во

время исследуемых бурь. Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 2.

Из таблицы 2 видно, что изменения жесткостей, полученных двумя способами, коррелируют между собой хуже всего во время умеренной бури 1997 г. Кроме того, низкие значения корреляции оказались на ст. Токио для всех бурь, кроме очень больших бурь 2003 г. и 2004 г. (2004 I). На остальных станциях $\Delta R_{\rm crc}$ и $\Delta R_{\rm ad}$ находятся между собой в хорошем согласии, коэффициенты корреляции для каждой бури мало отличаются друг от друга. В последней строчке табл. 2 приведены корреляционные коэффициенты k между ΔR_{crc} и ΔR_{adb} , усредненные по всем станциям. Они находятся в пределах 0.59-0.90 для всех бурь, кроме бури 1997 г., где коэффициент k опускается до 0.32. Наибольшего значения коэффициент корреляции достигает для очень интенсивных бурь в ноябре 2003 г. (Dst = -373 нТл) и 7-8 ноября 2004 г. (Dst = = -472 нТл), а наименьшая корреляция наблюдается для бурь 1997 г. (Dst = -78 нТл) и 2012 г. (Dst = -143 нTл). Отсюда можно заключить, что модель Ts01 хорошо описывает магнитосферное поле очень сильных бурь, но недостаточно адекватно отражает поле более слабых бурь. Этот результат не является неожиданным, так как модель Ts01 была специально разработана для сильных магнитосферных возмущений.

3.2. Корреляция наблюдательных вариаций ЖГО с межпланетными и геомагнитными параметрами

В таблице 3 приведены средние коэффициенты корреляции k между вариациями ЖГО, ΔR_{crc} , полученными по данным наблюдения на сети станций нейтронных мониторов, и параметрами солнечного ветра P, V, N, компонентами ММП Bzи By и Dst-индексом геомагнитной активности. Для иллюстрации геоэффективности параметров гелиосферы на диаграмме (рис. 1) показаны коэффициенты корреляции $k \ge 0.46$ для рассматриваемых бурь.

Из таблицы 3 и диаграммы (рис. 1) видно, что умеренная буря в январе 1997 г. стоит особняком в ряду рассматриваемых бурь. Во время этой бури корреляции $\Delta R_{\rm crc}$ с межпланетными параметрами и геомагнитной активностью были очень слабыми (0.01-0.35). Во время остальных бурь вариации ЖГО обнаруживали разную степень корреляции с параметрами гелиосферы и геомагнитной активностью, часто очень значительную. Наибольшую корреляцию $\Delta R_{\rm crc}$ обнаруживают с индексом геомагнитной активности Dst. Для Dst коэффициент корреляции k составляет 0.64-0.92. При этом прослеживается следующая закономерность: для очень интенсивных бурь 18-24 ноября 2003 г. (Dst = -373 нТл) и 7-8 ноября 2004 г. (Dst = -472 нTл) зависимость ΔR_{crc} от параметров

Параметр	1997	2003	2004 I	2004 II	2005	2012	2015
Dst	0.35	0.80	0.92	0.67	0.75	0.64	0.83
Bz	0.29	0.42	0.61	0.10	-0.13	0.33	0.21
By	0.01	0.37	-0.24	-0.06	-0.07	-0.27	-0.21
N	0.29	-0.49	0.66	0.01	0.28	0.23	0.26
V	-0.04	0.14	-0.82	-0.53	-0.49	-0.37	-0.62
Р	0.29	-0.46	0.46	-0.20	0.12	-0.10	-0.10

Таблица 3. Коэффициенты корреляции вариаций жесткостей обрезания ΔR_{crc} с параметрами солнечного ветра, ММП и геомагнитной активности

СВ и ММП проявляется очень сильно, а для более умеренных бурь 9–15 января 1997 г. (Dst = -78) и 7–11 марта 2012 г. (Dst = -143) эта зависимость становится несущественной. Другими словами, чем более высокие отрицательные значения достигаются Dst-индексом геомагнитной активности в максимуме бури, т.е. чем сильнее буря, тем более тесная связь наблюдается между $\Delta R_{\rm crc}$ и Dst.

Наиболее геоэффективным межпланетным параметром для вариаций наблюдательных геомагнитных порогов оказалась скорость солнечного ветра V. Антикорреляция ΔR_{crc} и V прослеживается почти для всех бурь, достигая наибольшего значения (-0.82) для первой бури 2004 г. Корреляция с *Bz*, напротив, выражена слабо. Только для бурь 2003 г. и 2004 г. (I), во время которых *Bz* достигла гигантских значений ≈ -50 нTл, коэффициент корреляции доходит до 0.42 и 0.61 соответственно. Компонента Ву ММП практически не обнаруживает связи с ΔR_{crc} . Согласно таблице 3, динамическое давление Р также практически не оказывает влияния на вариации ЖГО. Только для бурь 2003 г. и 2004 г. (2004 I) коэффициент корреляции $\Delta R_{\rm crc}$ с *P* приближается к 0.5, причем для этих бурь знак корреляции различен. Корреляция $\Delta R_{\rm crc}$ и N для этих же двух бурь носит более выраженный характер (k = -0.49 и k = 0.66соответственно). При этом следует отметить, что корреляция с плотностью N для этих двух бурь, так же как и корреляция с давлением Р, имеет разный знак (положительная для бури 2004 г. (I) и отрицательная для бури 2003 г.).

Диаграмма (рис. 1) наглядно показывает, какие параметры оказывали наиболее существенное влияние на вариации ЖГО для каждой из рассматриваемых бурь. Ясно видна очень сильная связь ΔR_{crc} с *Dst*. Видно, что наиболее чувствительными к параметрам гелиосферы значения ΔR_{crc} были во время первой бури 2004 г. (табл. 3 и рис. 1). Для этой бури корреляция ΔR_{crc} практически со всеми параметрами (кроме *By*-компоненты ММП) достаточно высока, т.е. все параметры солнечного ветра и ММП были в значительной степени геоэффективными. Для бури 2003 г. геоэффективными оказались плотность и давление.

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 59 № 5 2019

Остальные бури показали существенную зависимость $\Delta R_{\rm crc}$ лишь от одного параметра — скорости солнечного ветра.

3.3. Корреляция модельных вариаций ЖГО с межпланетными и геомагнитными параметрами

Далее мы провели сравнение найденных корреляционных соотношений для наблюдательных $\Delta R_{\rm crc}$ с аналогичными корреляциями для модельных $\Delta R_{\rm эф}$. В таблице 4 приведены усредненные по всем станциям коэффициенты корреляции модельных значений $\Delta R_{\rm эф}$ с параметрами солнечного ветра *P*, *V*, *N*, с компонентами *Bz* и *By* ММП и *Dst*-индексом геомагнитной активности.

Из таблицы 4 видно, что наибольшая корреляция наблюдается для *Dst*-индекса: для всех бурь k = 0.87 - 0.98. Антикорреляция с *V* наблюдается для большинства бурь, достигая k = -0.81 для первой бури 2004 г. Корреляция с *N* наблюдается только для бурь 2003 г. (-0.68) и первой бури 2004 г. (0.57). Корреляция с *P* (0.67) найдена только для бури 2003 г. Значительная корреляция с *Bz*-ком-



Рис. 1. Параметры солнечного ветра и геомагнитной активности, обнаружившие наибольшую корреляцию (k > 0.46) с вариациями наблюдательной жесткости обрезания $\Delta R_{\rm crc}$ для рассмотренных магнитных бурь.

Параметр	1997	2003	2004 I	2004 II	2005	2012	2015
Dst	0.87	0.98	0.98	0.95	0.94	0.90	0.93
Bz	0.69	0.70	0.74	0.49	0.18	0.66	0.40
By	0.35	0.15	-0.20	-0.04	-0.24	-0.38	-0.09
N	0.33	-0.68	0.57	0.12	0.21	0.10	0.33
V	-0.16	0.05	-0.81	-0.61	-0.65	-0.36	-0.73
Р	0.29	-0.67	0.37	-0.13	-0.07	-0.16	-0.06

Таблица 4. Коэффициенты корреляции вариаций жесткостей обрезания $\Delta R_{\rm эф}$ с параметрами солнечного ветра, ММП и геомагнитной активности

понентой ММП наблюдается для пяти из семи рассматриваемых бурь.

Для иллюстрации геоэффективности параметров гелиосферы для рассматриваемых бурь на диаграмме (рис. 2) показаны коэффициенты корреляции $k \ge 0.5$.

Из сравнения табл. 3 и 4, а также рис. 1 и рис. 2, видно, что коэффициенты корреляции с межпланетными параметрами для $\Delta R_{\rm crc}$ и $\Delta R_{
m s\phi}$ в целом хорошо согласуются между собой. Знаки коэффициентов корреляции также совпадают. Что касается величины коэффициентов корреляции, то для модельных $\Delta R_{
m sol}$ они несколько выше, чем для $\Delta R_{\rm crc}$, полученных на основе наблюдательных данных. Этот результат, вероятно, связан с тем фактом, что все исследуемые в нашей работе характеристики солнечного ветра, компоненты ММП и значения Dst являются входными параметрами модели Ts01. С этим же связано и другое отличие корреляций $\Delta R_{
m sol}$ и $\Delta R_{
m crc}$ с межпланетными параметрами. Для большинства бурь была получена довольно высокая корреляция Bz с модельным $\Delta R_{\rm ab}$, в то время как корреляция Bz с наблюдательной величиной $\Delta R_{
m crc}$ обнаруживается



Рис. 2. Параметры солнечного ветра и геомагнитной активности, обнаружившие наибольшую корреляцию (k > 0.5) с изменениями модельной жесткости обрезания ΔR_{ab} для рассмотренных магнитных бурь.

лишь во время двух гигантских бурь 2003 г. и 2004 г. (2004 I), во время которых достигались очень большие отрицательные значения $B_Z \approx -50$ нТл. Отсюда следует, что модель магнитосферного магнитного поля Ts01, по-видимому, несколько переоценивает влияние B_Z на динамику ЖГО.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ чувствительности наблюдательных величин $\Delta R_{\rm crc}$ и модельных значений ΔR_{ab} к межпланетным параметрам и геомагнитной активности показывает, что чувствительность сильно варьирует от бури к буре. При этом связь ΔR с геомагнитной активностью демонстрирует четкую закономерность - увеличивающуюся корреляцию с уменьшением Dst, т.е. с ростом интенсивности бури. Напротив, чувствительность ΔR к динамическим и магнитным параметрам солнечного ветра не показывает ясных закономерностей: от бури к буре меняется не только величина коэффициентов корреляции, но и их знак. Характерным примером являются буря 2003 г. и первая буря 2004 г., во время которых как $\Delta R_{\rm crc}$, так и $\Delta R_{\rm ph}$ обнаруживают разный знак корреляции с динамическими параметрами солнечного ветра *N*, *P*, *V* (табл. 2 и 4, рис. 1 и 2). По-видимому, понять это расхождение можно в свете результатов работы [Adriani et al., 2016], где были проведены прямые измерения вариаций ЖГО на КА РАМЕLА во время бури 2006 г. Вариации широты обрезания как функции ЖГО изучались на относительно коротких интервалах времени, соответствующих орбитальному периоду космического аппарата (≈94 мин). Анализ выявил слабую антикорреляция ΔR с N (-0.12) на масштабе всей бури и высокие корреляционные коэффициенты противоположного знака в начальной (-0.74) и главной (0.94) фазах. Возможно, полученная в нашей работе отрицательная корреляция ΔR с N и Pво время бури 2003 г. и положительная во время бури 2004 г. зависят от доминирования разных фаз в этих бурях. Для разных бурь, для разных условий в солнечном ветре может реализовываться различный механизм влияния параметров СВ на ЖГО в зависимости от доминирования различных токовых систем. Например, увеличение давления СВ приводит к увеличению токов поперек хвоста магнитосферы и токов на магнитопаузе, которые имеют противоположное влияние на

рек хвоста магнитосферы и токов на магнитопаузе, которые имеют противоположное влияние на ЖГО. В идеале, чтобы понять зависимость вариаций ЖГО от параметров СВ и ММП, следует изучить вклад каждой токовой системы в динамику геомагнитного экрана и их связь с параметрами гелиосферы. Однако разделить суммарное магнитное поле от различных токовых источников на отдельные слагаемые идеальным способом не удается.

Полученная нами картина корреляционных соотношений, изменяющихся от бури к буре, свидетельствуют о том, что влияние межпланетной среды на ΔR носит сложный характер, что является отражением сложной и не до конца понятой физики взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли во время сильных возмущений.

Общепризнанным считается, что основную роль в развитии магнитосферных возмущений играет южная компонента Bz межпланетного магнитного поля, рост которой вызывает пересоединение магнитного поля солнечного ветра и поля геомагнитосферы, а также динамическое давление солнечного ветра Р, ответственное за сжатие магнитосферы [Dungey, 1961; Akasofu, 1981; Russell, 2000]. Оба эти фактора ослабляют геомагнитный экран и облегчают проникновение плазмы солнечного ветра в магнитосферу и атмосферу Земли. С этой точки зрения довольно неожиданным является полученный нами результат о том, что коэффициенты корреляции ΔR с плотностью и скоростью солнечного ветра значительно превышают коэффициенты корреляции с давлением Р.

Долгое время увеличение плотности N во время магнитной бури рассматривалось лишь как увеличение одной из составляющих давления. Однако в работах [Fenrich and Luhman, 1998; Crooker, 2000] была высказана точка зрения, что давление является самостоятельным параметром, действующим независимо. Эта точка зрения базируется на появившемся понимании того, что ответ магнитосферы на изменения плотности солнечного ветра есть ответ на изменения во время бури плотности плазменного слоя; для этого процесса временная шкала много больше (примерно 5 ч.), чем для ответа на B_{z} (<1 ч) [Smith et al., 1999. и ссылки там]. При этом увеличение плотности приводит к увеличению давления лишь в том случае, если в это время наблюдается южная компонента ММП [Fenrich and Luhman, 1998]. В работах [Khabarova and Rudenchik, 2003; Khabarova, 2007] статистическая обработка спутниковых данных также показала, что плотность солнечного ветра N является важным независимым параметром, она определяет момент начала магнитной бури, что расширяет возможности прогноза возмущенного состояния магнитного поля Земли. Возрастание N совместно с отрицательной Bz -компонентой приводит к появлению в основном слабых и умеренных, но иногда и сильных бурь. Однако спусковой эффект роста плотности не определен статистически достаточно четко, так как запаздывание минимума Dst по отношению к скачку N и минимуму Вг сильно меняется от бури к буре [Khabarova, 2007]. Это согласуется с нашим результатом о том, что ответ геомагнитного экрана на изменение параметров солнечного ветра является индивидуальным для каждой бури и связан со специфическими особенностями взаимолействия солнечного ветра и магнитосферы для различных бурь.

Наш результат, свидетельствующий о том, что для большинства рассматриваемых в работе магнитных бурь наиболее геоэффективным параметром солнечного ветра, наиболее существенно влияющим на ЖГО, является скорость, заслуживает отдельного рассмотрения. Начиная с исторической работы [Snyder et al., 1963], где было показано, что Кр-индекс геомагнитной активности зависит от V, но что эта связь не носит точного характера и достаточно произвольна, было много попыток выявить роль V в развитии магнитной бури. В работе [Gosling et al., 1991] авторы заключили, что скорость солнечного ветра является ключевым параметром в развитии очень интенсивных магнитных бурь. С другой стороны, авторы работы [Tsurutani et al., 1992] пришли к выводу, что ключевую роль в возникновении и развитии интенсивных бурь играет не скорость, а южная компонента магнитного поля Bz. В работе [Schreiber, 1998] получено, что во время периодов, когда высокоскоростные потоки из корональных дыр наблюдаются наиболее часто, интенсивность геомагнитных возмущений зависит больше от величины скорости потоков, чем от направленной к югу Bz-компоненты. Неоднозначность зависимости генерации и развития бури от скорости солнечного ветра проявляется и в неоднозначной связи между ΔR и *V*. Несмотря на то, что для большинства исследуемых в нашей работе бурь наблюдается сильная зависимость ΔR от V, эта связь, однако, по каким-то причинам нарушается в двух очень разных случаях – для умеренной бури 1997 г., и для очень интенсивной бури 2003 г.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассчитали корреляцию вариаций жесткостей геомагнитного обрезания ΔR_{crc} и $\Delta R_{э\phi}$ во время семи бурь 23-го и 24-го солнечных циклов с межпланетными параметрами и *Dst*-индексом геомагнитной активности. Все рассмотренные бури принадлежат к классу очень сильных, кроме умеренной бури в январе 1997 г. Вариации ЖГО получены двумя независимыми методами — наблюдательным для $\Delta R_{\rm crc}$ и модельным для $\Delta R_{\rm эф}$. Основные результаты анализа следующие.

1. Из всех рассмотренных параметров наибольшее влияние на ΔR_{crc} и $\Delta R_{э\phi}$ оказывает *Dst*-индекс. Коэффициент корреляции *k* между ΔR_{crc} и *Dst* лежит в пределах 0.64–0.92 для всех бурь, кроме бури 1997 г., для которой k = 0.32. Коэффициент корреляции между $\Delta R_{э\phi}$ и *Dst* лежит в пределах 0.87–0.98 для всех бурь. Это подтверждает полученные ранее результаты, свидетельствующие о доминирующей роли кольцевого тока в вариациях ЖГО для интенсивных бурь. При этом связь ΔR с геомагнитной активностью демонстрирует четкую закономерность — корреляция увеличивается с уменьшением *Dst*, т.е. с ростом интенсивности бури.

2. Наиболее геоэффективным межпланетным параметром для большинства рассмотренных бурь оказалась скорость солнечного ветра *V*. Антикорреляция $\Delta R_{\rm crc}$ и *V* прослеживается почти для всех бурь, достигая наибольшего значения (-0.82) для первой бури 2004 г. Такая же картина наблюдается и для $\Delta R_{\rm sp}$.

3. Корреляция $\Delta R_{\rm crc}$ с B_Z выражена слабо. Только для гигантских бурь 2003 г. и 2004 г. (2004 I), во время которых наблюдались очень большие значения $B_Z \approx -50$ нТл, коэффициент корреляции достигает значений 0.42 и 0.61 соответственно. Компонента B_Y и динамическое давление солнечного ветра P практически не обнаруживает связи с $\Delta R_{\rm crc}$ Только во время бурь 2003 г. и 2004 г. (2004 I) коэффициент корреляции $\Delta R_{\rm crc}$ с P приближается к 0.5, причем для этих бурь знак корреляции различен.

4. Вариации ЖГО $\Delta R_{\rm crc}$ и $\Delta R_{\rm эф}$ в целом хорошо согласуются между собой. Коэффициенты корреляции наблюдательных $\Delta R_{\rm crc}$ и модельных $\Delta R_{\rm эф}$ с межпланетными параметрами и геомагнитной активностью в целом также находятся в согласии. Однако, величины коэффициентов корреляции для модельных $\Delta R_{\rm эф}$ несколько выше, чем для наблюдательных $\Delta R_{\rm crc}$. Кроме того, получена довольно высокая корреляция $\Delta R_{\rm эф}$ с *Bz* для пяти бурь, в то время как для наблюдательных $\Delta R_{\rm crc}$ некоторая связь с *Bz* обнаруживается лишь для двух бурь. Отсюда можно сделать вывод, что модель магнитосферного магнитного поля Ts01 несколько переоценивает влияние *Bz* на динамику ЖГО.

Результаты, представленные в этой работе, показывают, что чувствительность вариаций жесткостей обрезания ΔR к параметрам геомагнитной активности и параметрам межпланетной среды имеет разный характер. Прослеживается сильная корреляция ΔR и *Dst*-индекса геомагнитной активности, причем эта корреляция усиливается с ростом интенсивности бури. Напротив, чувствительность ΔR к динамическим и магнитным параметрам межпланетной среды не показывает ясных закономерностей: в этом случае от бури к буре меняется не только величина коэффициентов корреляции, но и их знак. Полученная нами картина корреляционных соотношений свидетельствует о том, что влияние межпланетной среды на ΔR носит сложный характер, что является отражением сложной и не до конца понятой физики взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли во время сильных возмущений.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Расчеты по методу СГС получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Ангара" (http://ckp-rf.ru/ckp/3056/) и научной установки "Российская национальная наземная сеть станций космических лучей. Авторы благодарны анонимному рецензенту за полезные замечания и предложения по улучшению статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы Фундаментальных научных исследований II.16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– 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 // 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. https://doi.org/10.12737/7890

- 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

- Akasofu S.I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // Space Sci. Rev. V. 28. P. 121–190. 1981.

https://doi.org/10.1007/BF00218810

- 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

Crooker N.U. Solar and geliospheric geoeffective disturbances // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 62. P. 1071–1085. 2000.

— Dorman L.I., Gushchina R.G., Smart D.F., Shea M.A. Effective cut-off rigidities of cosmic rays. M.: Nauka, 168 p. 1972.

- Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Diagnostics of the electromagnetic characteristics of the interplanetary medium based on cosmic ray effects // Geomagn. Aeronomy. V. 53. № 4. P. 430. 2013.

https://doi.org/10.1134/S0016793213040075

- *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

- Gosling J.T., McComas D.J., Phillips J.L., Bame S.J. Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections // J. Geophys. Res. V. 96. P. 7831–7846, 1991.

- 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

- *Fenrich F.R., Luhman J.D.* Geomagnetic responses to magnetic clouds of different polarity // Geophys. Res. Lett. V. 25. P. 2999–3002. 1998.

- 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.

- *Khabarova O.V.* Current problems of magnetic storm prediction and possible ways of their solving// Sun and Geosphere. V. B. 2. № 1. P. 32–37. 2007.

- Khabarova O.V., Rudenchik E.A. Peculiarities of solar wind and IMF oscillatory regime's changes before geomagnetic storms - Wavelet analysis results // Her. Rus. Acad. Sci. № 1 (21). P. 1–28. 2003. http://files.olgakhabarova. webnode.com/200000019-44bb445b55/density_before_storms.pdf . 2003.

- 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. https://doi.org/10.1029/2009SW000488

- 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

- Leske R.A., Mewaldt R.A., Stone E.C., von Rosenvinge T.T. Observations of geomagnetic cutoff variations during solar energetic particle events and implications for the radiation environment at the space station // J. Geophys. Res. V. 106. P. 30011–30022. 2001.

https://doi.org/10.1029/2000JA000212

- 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. for Nucl. Sci. and Eng., Mass. Inst. of Technol. Cambridge. 146 p. 1962.

- *Russell C. T.* The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: A tutorial // IEEE Trans. Plasma Sci. V. 28. \mathbb{N} 6. P. 1818–1830. 2000.

https://doi.org/10.1109/27.902211

- Schreiber H. On the periodic variations of geomagnetic activity indices Ap and ap // Geophys. V. 16. P. 510-521. 1998.

- 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., Tanaka T., Den M., Obara T. Dependence of the cutoff latitude of solar energetic protons on the southward component of the IMF // Adv. Space Res. V. 38. P. 503–506. 2006.

– Shimazu H. Solar proton event and proton propagation in the earth's magnetosphere // J. of NICT. V. 1. P. 191–199. 2009.

- Smart D.F., Shea M.A. The space-developed dynamic vertical cutoff rigidity model and its applicability to aircraft radiation dose // Adv. Space Res. V. 32. № 1. P. 103–108. 2003.

https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)90376-0

- Smith J.P., Thomsen M.F., Borovsky J.E., Collier M. Solar wind density as a driver for the ring current in mild storms // Geophys. Res. Lett. V. 26. P. 1797–1800. 1999.

- Snyder C.W., Neugebauer M., Rao U.R. The solar wind velocity and its correlation with cosmic-ray variations and with solar and geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 68. P. 6361-6370. 1963.

- *Tyssøy H.N., Stadsnes J.* Cutoff latitude variation during solar proton events: Causes and consequences // J. Geophys. Res. –Space. V. 120. P. 553–563. 2014. https://doi.org/10.1002/2014JA0200508

- *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // J. Geophys. Res. V. 107. \mathbb{N} A8. 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. 2002b. https://doi.org/10.1029/2001JA000220

- *Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C.* Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? // J. Geophys. Res. V. 108. A5. 1209. 2003. https://doi.org/10.1029/2002JA009808

- *Tsyganenko NA., Sitnov M.I.* Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 110. № A03208. 2005. https://doi.org/10.1029/2004JA010798

- Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Lee Y.T. Great magnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 19. P. 73–86. 1992.

- 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. № 7. P. 1230–1237. 2013.