
ПАРАМЕТРЫ ТОКОВЫХ СИСТЕМ В МАГНИТОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПЕРИОД МАГНИТНОЙ БУРИ В ИЮНЕ 2015 г.

PARAMETERS OF CURRENT SYSTEMS IN THE MAGNETOSPHERE AS DERIVED FROM OBSERVATIONS OF COSMIC RAYS DURING THE 2015 JUNE MAGNETIC STORM

Г.Н. Кичигин

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

М.В. Кравцова

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

В.Е. Сдобнов

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

G.N. Kichigin

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

M.V. Kravtsova

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

V.E. Sdobnov

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

Аннотация. По данным измерений космических лучей на мировой сети станций рассчитаны вариации планетарной системы жесткости геомагнитного обрезания в период умеренной геомагнитной бури в июне 2015 г. В рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли, учитывающей токи на магнитопаузе и кольцевой ток, определены расстояние до подсолнечной точки и радиус кольцевого тока, а также вклад кольцевого тока в изменения жесткости геомагнитного обрезания и в *Dst*-индекс.

Ключевые слова: магнитосфера, токовая система, магнитная буря, космические лучи.

Abstract. Basing on measurements of cosmic rays at the worldwide network of stations, we calculate variations in the planetary system of geomagnetic cutoff rigidity for the 2015 June moderate geomagnetic storm. Using the axisymmetric model of the limited magnetosphere taking into account magnetopause currents and the ring current, we determine the distance to the subsolar point and the ring current radius, as well as the contribution of the ring current to variations in the geomagnetic cutoff rigidity and to the *Dst* index.

Keywords: magnetosphere, current system, magnetic storm, cosmic rays.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика крупномасштабных токовых систем в возмущенной магнитосфере до сих пор является одним из открытых вопросов солнечно-земной физики.

Магнитная буря является откликом магнитосферы на внезапное увеличение динамического давления солнечного ветра (СВ). Она сопровождается интенсивным энерговыделением в магнитосфере и в ионосфере, которое контролируется главным образом величиной и направлением межпланетного магнитного поля (ММП).

В периоды магнитных бурь резко возрастает депрессия магнитного поля на низких широтах, которая характеризуется увеличением отрицательных значений *Dst*-индекса. По современным представлениям на его вариации сильное влияние оказывает симметричный кольцевой ток во внутренней магнитосфере DR, поперечный ток в хвосте магнитосферы DT и ток на магнитопаузе DCF, таким образом, $Dst = DR + DT + DCF$ [Feldstein et al., 2005].

Токи на магнитопаузе реагируют на изменение параметров СВ. Поджатие магнитосферы при усилении динамического давления СВ приводит к кратковременной положительной вариации магнитосферного поля во внутренней и дневной магнито-

сфере (SSC — sudden storm commencement, внезапное начало бури). Расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе — один из важных параметров магнитосферы, который характеризует поджатие магнитопаузы. Его изменения при внезапных скачках динамического давления СВ приводят к значительным вариациям магнитосферного магнитного поля.

Без учета продольных токов токовая система магнитосферного хвоста включает в себя токи поперек хвоста магнитосферы и токи замыкания на магнитопаузе.

Кольцевой ток является наиболее инертной частью магнитосферы. Он развивается вследствие инжекции заряженных частиц из хвоста магнитосферы и разрушается в результате перезарядки с атомами экзосферы, кулоновских столкновений и волновых процессов. Усиленная инжекция создается магнитосферными суббурями, сопровождающимися сильной диполизацией магнитного поля хвоста. Магнитное поле кольцевого тока направлено к югу во внутренней магнитосфере и обеспечивает характерную крупномасштабную структуру вариаций измеряемого магнитного поля во время магнитной бури.

Соотношение между источниками *Dst*-индекса меняется на разных стадиях развития магнитной

бури и может характеризовать относительную динамику магнитосферных токовых систем во время возмущений [Alexeev et al., 1996; Maltsev et al., 1996; Greenspan, Hamilton, 2000].

Вклады в *Dst*-индекс от DR- и DT-токов зависят от интенсивности бури. Для слабых и умеренных бурь вклад от DT-тока может достигать значений, сравнимых со значениями вклада от DR-тока, а иногда даже превышать их. Для сильных бурь роль кольцевого тока возрастает. При бурях средней интенсивности около $-(100\div 200)$ нТл поле токов хвоста испытывает насыщение, достигая максимально возможного значения, в то время как кольцевой ток находится в условиях, когда он имеет возможность дальнейшего развития [Ganushkina et al., 2004; Kalegaev et al., 2005].

Динамические процессы, происходящие в межпланетной среде и магнитосфере Земли, вследствие их электромагнитной природы воздействуют на заряженные частицы космического излучения, порождая вариации пространственного, углового и энергетического распределения последних. Поэтому данные о вариациях интенсивности космических лучей (КЛ) могут дать ценную информацию об электромагнитных условиях в космическом пространстве.

Строение полного магнитного поля, в котором движутся частицы КЛ, определяет характер планетарного распределения КЛ и его временную зависимость от геомагнитного поля. Изменения геомагнитного поля вызывают изменение асимптотических направлений прихода частиц в пункт наблюдения, а также изменение жесткости геомагнитного обреза (ЖГО) в этом пункте, что приводит к вариациям интенсивности КЛ магнитосферного происхождения, которые, как правило, наблюдаются наряду с вариациями КЛ межпланетного происхождения в периоды геомагнитных возмущений.

Для разделения вкладов межпланетных и магнитосферных вариаций интенсивности КЛ, наблюдаемых на поверхности Земли, в ИСЗФ СО РАН разработан метод спектрографической глобальной съемки (СГС), который 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 ЖГО за каждый час наблюдений [Дворников и др., 1984, 1986] 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.). Данное обстоятельство позволяет наряду с фазами первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии определять жесткостный спектр изотропной составляющей и анизотропии по фазе питч-угловой анизотропии получать информацию об ориентации ММП, а также определять вариации планетарной системы ЖГО за каждый час наблюдений или за меньшие временные интервалы.

Информация об изменениях планетарной системы ЖГО в периоды сильных геомагнитных возмущений

использовалась для тестирования моделей земной магнитосферы (см., например, [Tyasto et al., 2011, 2013]).

В настоящей работе исследуются вариации планетарной системы ЖГО в период умеренной геомагнитной бури в июне 2015 г. по данным наблюдений интенсивности КЛ на мировой сети станций. В рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли [Кичигин, Сдобнов, 2017], учитывая токи на магнитопаузе и кольцевой ток, рассчитывается расстояние до подсолнечной точки и радиус кольцевого тока.

Во второй половине июня 2015 г. в активной области (АО) 12371, одной из крупнейших в текущем солнечном цикле, наблюдалась повышенная активность [<https://www.solarmonitor.org>]. В частности, 21 и 22 июня 2015 г. АО дала две вспышки, сопровождавшиеся КВМ шириной около 360° , имеющими вид полного гало: вспышка M2.0 (координаты 12° N, 13° E) началась в 02:06 UT 21 июня 2015 г., а в 02:36 UT наблюдался КВМ со скоростью около 1400 км/с. Вспышка M6.5 (координаты 18° N, 06° W) началась в 17:39 UT 22 июня 2015 г., а в 18:23 UT — КВМ со скоростью около 1200 км/с.

Взаимодействие магнитных облаков 21 и 22 июня, когда последующее облако распространялось по уже возмущенной среде, привело в совокупности к сильному возмущению межпланетной среды в окрестности Земли и, как следствие, к геомагнитной буре с максимальной депрессией геомагнитного поля 23 июня 2015 г. (*Dst*-индекс составил -204 нТл).

Мировой сетью станций нейтронных мониторов 23 июня 2015 г. был зарегистрирован форбуш-эффект с амплитудой модуляции интенсивности нейтронной компоненты КЛ $\sim 6\text{--}9\%$.

ДАННЫЕ И МЕТОД

Для получения информации об изменениях планетарной системы ЖГО использовались данные мировой сети станций нейтронных мониторов (41 нейтронный монитор) [<ftp://cr0.irmiran.rssi.ru>], исправленные за давление и усредненные за часовые интервалы, а также информация об электромагнитной обстановке в межпланетном пространстве в период гелиосферных и магнитосферных возмущений [<https://www.solarmonitor.org>; http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2015_06/univ2015_06.html; <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>] с применением метода СГС [Дворников и др., 1986]. Амплитуды модуляции КЛ отсчитывались от фонового уровня 2 июня 2015 г.

Статистическая ошибка при определении изменений ЖГО по данным мировой сети станций КЛ методом СГС составляет $\sim \pm 0.05\div 0.07$ ГВ.

С использованием результатов расчетов зависимости изменений ЖГО от ЖГО по данным мировой сети станций КЛ $\Delta R_{об}$ и изменений ЖГО от ЖГО в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли ΔR_{cal} [Кичигин, Сдобнов, 2017] рассчитываются некоторые параметры магнитосферных токовых систем (DCF и DR). Этими параметрами в данной модели являются радиусы кольцевого тока r_c , токов на магнитопаузе r_m и *Dst*-индекс. Параметры токовых систем r_c , r_m опре-

деляются путем их перебора для минимизации функционала

$$\left(\sum_i [\Delta R_{ob}(R_i) - \Delta R_{cal}(R_i, r_c, r_m, Dst)]^2 \right) = \min.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На рис. 1 для события в июне 2015 г. показаны амплитуды вариаций интенсивности КЛ и временной ход изменений ЖГО ΔR_c в Иркутске ($R_c=3.66$ ГВ) (синяя линия) совместно с Dst -индексом (красная линия). Максимальное понижение интенсивности нейтронной компоненты КЛ в Иркутске в июне составило $\sim -8\%$. Видно удовлетворительное соответствие временных вариаций ΔR_c и Dst -индекса для периода 22–28 июня 2015 г., коэффициент корреляции составляет ~ 0.82 .

На рис. 2, а–в представлены зависимости изменений ЖГО от ЖГО для разных стадий развития магнитной бури в июне 2015 г. Изменения рассчитаны по данным наблюдений КЛ на мировой сети станций (синяя линия). Показаны также результаты расчета изменений ЖГО по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током [Кичигин, Сдобнов, 2017] (красная линия). На отдельных панелях приведены даты и мировое время этих зависимостей, а также параметры (r_c — радиус кольцевого тока, r_m — радиус магнитосферы и рассчитанный Dst_{cal} -индекс) токовых систем в модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током, при которых результаты расчетов по данной модели наиболее близки результатам расчетов изменений ЖГО по данным мировой сети станций КЛ. Приведены также наблюдаемые значения Dst_{ob} -индекса.

Видно, что для приведенных параметров токовых систем изменения ЖГО, рассчитанные по данным наблюдений КЛ на мировой сети станций и по модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током,

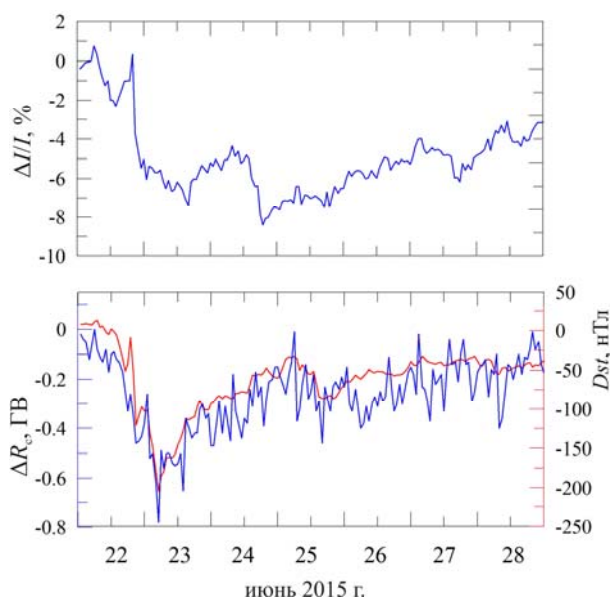


Рис. 1. Амплитуды вариаций интенсивности КЛ $\Delta I/I$ (вверху); временной ход изменений ЖГО ΔR_c в Иркутске ($R_c=3.66$ ГВ) (синяя кривая) совместно с Dst -индексом (красная кривая) для события в июне 2015 г.

в большинстве случаев удовлетворительно согласуются между собой за исключением некоторых периодов главной фазы (см. рис. 2, а) и близких к ней периодов приведенной магнитной бури. Рассчитанные и наблюдаемые Dst -индексы отличаются друг от друга от нескольких нТл до нескольких десятков нТл. Средние радиусы кольцевого тока в единицах радиуса Земли в приведенных на рис. 2, а–в примерах составляют для начальной фазы геомагнитной бури в июне 2015 г. $r_c \sim 3.6$, для главной фазы $r_c \sim 4.2$, на фазе восстановления $r_c \sim 4.3$. Среднее расстояние до подсолнечной точки в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы для разных фаз развития геомагнитной бури составляет для начальной фазы геомагнитной бури в июне 2015 г. $r_m \sim 8.3$, для главной фазы $r_m \sim 8.5$, на фазе восстановления $r_m \sim 8.7$. Минимальные радиусы кольцевого тока наблюдаются в главной фазе геомагнитной бури с последующим возрастанием на фазе восстановления, а расстояние до подсолнечной точки минимально на начальной фазе геомагнитного возмущения.

Главная особенность магнитной бури — резкое усиление кольцевого тока вследствие инжекции заряженных частиц из хвоста магнитосферы. Во время магнитной бури наряду с резким усилением кольцевого тока вследствие инжекции заряженных частиц из хвоста магнитосферы происходит значительное усиление и других магнитосферных токовых систем: токов хвоста, токов на магнитопаузе и не учитываемых в нашей модели продольных и ионосферных токов. Соотношение между вкладами этих токовых систем в Dst -индекс на разных фазах магнитной бури может характеризовать их относительную динамику во время магнитосферных возмущений.

Приводимые нами радиусы кольцевого тока и тока на магнитопаузе отражают суммарные вклады нескольких токовых систем. Поэтому правильнее говорить об эффективных радиусах токовых систем, дающих вклады в Dst -индекс подобно кольцевому току и току на магнитопаузе.

В настоящее время актуальна оценка относительного вклада магнитосферных токовых систем в измеряемую на поверхности Земли вариацию магнитного поля во время магнитных бурь. Соотношение между источниками Dst -индекса меняется на разных стадиях развития магнитной бури и может характеризовать относительную динамику магнитосферных токовых систем во время возмущений.

Что касается магнитосферных токовых систем, отличных от кольцевого тока, в настоящее время отсутствуют стандартные экспериментальные методики, позволяющие оценить их вклады в Dst -индекс. Хотя использование измерений на геостационарных аппаратах и позволяет получить грубые оценки для вариации токового слоя [Ohtani, 2001], нельзя однозначно разделить вклады основных магнитосферных токовых систем, составляющих магнитосферное магнитное поле, опираясь на измерения. Эти вклады можно вычислить, используя существующие на данный момент магнитосферные модели, которые позволяют рассчитать в отдельности поле каждого магнитосферного источника [Alexeev et al., 1996]. Современ-

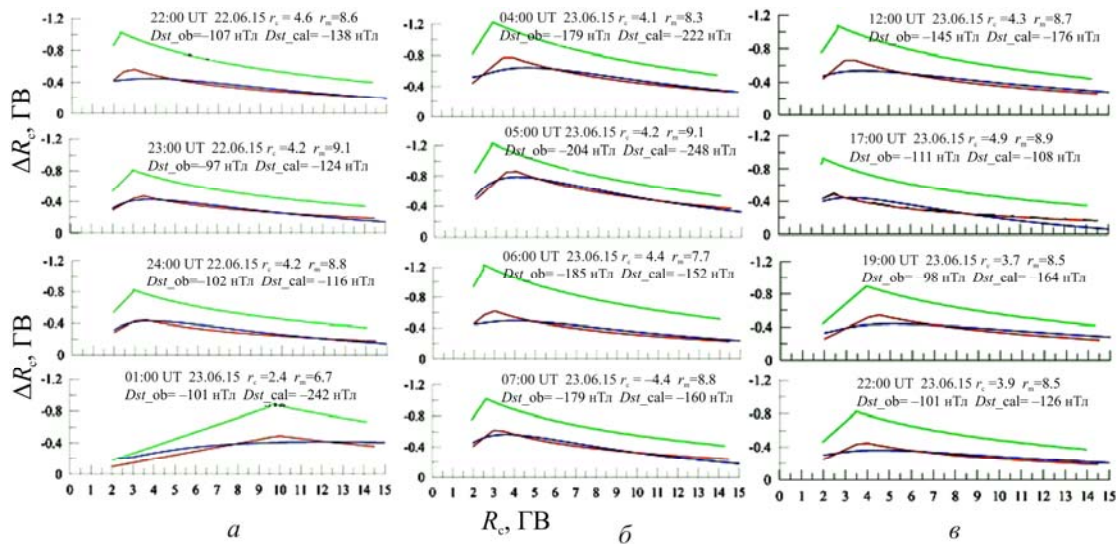


Рис. 2. Зависимость изменения ЖГО от ЖГО для разных фаз развития умеренной геомагнитной бури в июне 2015 г.: *а* — начальная фаза; *б* — главная фаза; *в* — фаза восстановления. Синяя линия — результаты, полученные по данным мировой сети станций КЛ методом СГС, красная линия — расчет по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током. Зеленая линия — вклад в изменения ЖГО от кольцевого тока, рассчитанный по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы

ные модели позволяют правильно предсказать поведение магнитного поля как в спокойные, так и в возмущенные периоды. В то же время, давая адекватное представление для профиля *Dst*-индекса, модели часто показывают сильно различающиеся оценки вкладов магнитосферных источников в *Dst*-индекс.

В работе [Alexeev et al., 2001] показано, что расхождения в оценке вклада токового слоя хвоста в *Dst*-индекс во время магнитных бурь зачастую связаны с отсутствием единой методики расчетов *Dst*-индекса на основе модельных вычислений. Вследствие этого авторы по-разному определяют и вклады в *Dst*-индекс магнитосферных токовых систем. Кроме того, особенности моделей, их области применимости (для эмпирических моделей), а также соотношения, используемые для параметризации (для теоретических моделей), могут существенно влиять на соотношения между магнитными полями от разных источников во время магнитной бури.

Причины расхождений могут иметь и физическую природу, что связано с развитием магнитных бурь разной мощности под воздействием различающихся условий в межпланетной среде и с историей состояния магнитосферы. Многообразие условий в межпланетной среде определяет сложную динамику магнитосферных токовых систем и, соответственно, измеряемого магнитного поля. При этом вариации магнитного поля во время магнитных бурь разной интенсивности могут характеризоваться разными соотношениями вкладов основных магнитосферных токовых систем.

В данной работе по параметрам токовых систем в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли в периоды магнитных бурь в июне 2015 г., мы рассчитали вклад эффективного кольцевого тока в изменения ЖГО. На рис. 2 этот

вклад представлен штрих-пунктирной линией. Вклад кольцевого тока в изменения ЖГО составляет не менее ~50–60 % на разных стадиях развития магнитной бури, а вклад в величину *Dst*-индекса — не менее 60–70 %.

ВЫВОДЫ

По данным наземных измерений КЛ на мировой сети станций рассчитаны изменения ЖГО в период геомагнитных возмущений в июне 2015 г. По полученным изменениям ЖГО в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли, учитывающей токи на магнитопаузе и кольцевой ток, рассчитаны параметры токовых систем, такие как расстояние до подсолнечной точки и радиус кольцевого тока, а также *Dst*-индекс. В рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли рассчитан вклад кольцевого тока в изменение ЖГО и *Dst*-индекс.

Проведенное исследование показало возможность по данным наземных измерений КЛ на мировой сети станций проводить количественную оценку параметров некоторых токовых систем в магнитосфере в периоды магнитных бурь.

Работа выполнялась при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 23 «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика» в рамках проекта «Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным и стратосферным наблюдениям». Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН) и УНУ «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (сеть СКЛ)».

Авторы выражают благодарность Лунюшкину С.Б. за проявленный интерес к работе, полезные обсуждения и замечания при подготовке к публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Сергеев А.В. Информативность метода спектрографической глобальной съемки. Препринт СибИЗМИР № 25–84. Иркутск, 1984. 26 с.

Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Сергеев А.В. Метод спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций интенсивности космических лучей межпланетного и магнитосферного происхождения // Вариации космических лучей и исследования космоса: Сб. науч. тр. М.: ИЗМИРАН, 1986. С. 232–237.

Кичигин Г.Н., Сдобнов В.Е. Жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57, № 2. С. 149–153.

Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., et al. Magnetic storms and magnetotail currents // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 7737–7747.

Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Feldstein Ya.I., Gromova L.I. The model description of magnetospheric magnetic field in the course of magnetic storm on January 9–12, 1997 // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 25683–25694.

Feldstein Y.I., Levitin A.E., Kozyra J., et al. Self-consistent modeling of the large-scale distortions in the geomagnetic field during the 24–27 September 1998 major magnetic storm // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, N A11. DOI: 10.1029/2004JA010584.

Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., Kubyshkina M.V., et al. Long-term evolution of magnetospheric current systems during storms // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. P. 1317–1334.

Greenspan M.E., Hamilton D.C. A test of the Dessler–Parker–Sckopke relation during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 5419–5430.

Kalegaev V.V., Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., et al. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms // *Ann. Geophys.* 2005. V. 26, N 2. P. 523–533.

Maltsev Y.P., Arykov A.A., Belova E.G., et al. Magnetic flux redistribution in the storm time magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 7697–7707.

Ohtani S., Nose M., Rostoker G., et al. Storm-substorm relationship: Contribution of the tail current to *Dst* // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 21199–21209.

Tyasto M.I., Danilova O.A., Sdobnov V.E. Comparison of cosmic ray cutoff rigidities as calculated with two empirical magnetospheric models for the extreme event of November 2003 // *J. Phys.: Conference Ser.* 2013. 409. 012224. DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012224.

Tyasto M.I., Danilova O.A., Sdobnov V.E. Variations in the geomagnetic cutoff rigidity of cosmic rays in the period of magnetospheric disturbances of May 2005: Their correlation with interplanetary parameters // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2011. 75: 808. DOI: 10.3103/S1062873811060414.

URL: <ftp://cr0.irmiran.rssi.ru> (дата обращения 5 мая 2017 г.).

URL: <https://www.solarmonitor.org> (дата обращения 5 мая 2017 г.).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 5 мая 2017 г.).

URL: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2015_06/univ2015_06.html.

REFERENCES

Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., Feldstein Y.I., Grafe A. Magnetic storms and magnetotail currents. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, pp. 7737–7747.

Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Feldstein Ya.I., Gromova L.I. The model description of magnetospheric magnetic field in the course of magnetic storm on January 9–12, 1997. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 25683–25694.

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V. Informativity of the Spectrographic Global Survey Method. Preprint SibIZMIR N 25–84. Irkutsk, 1984. 26 p. (In Russian).

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V. Spectrographic Global Survey method for research into variations of intensity of cosmic rays of interplanetary and magnetospheric origins. *Variatsii kosmicheskikh luchej i issledovaniya kosmosa: Sbornik nauchnykh trudov* [Cosmic Ray Variations and space research: Collected papers]. Moscow, IZMIRAN Publ., 1986. pp. 232–237. (In Russian).

Feldstein Y.I., Levitin A.E., Kozyra J., Tsurutani B.T., Prigancova A., Alperovich L., Gonzalez W.D., Mall U., Alexeev I.I., Gromova L.I., Dremukhina L.A. Self-consistent modeling of the large-scale distortions in the geomagnetic field during the 24–27 September 1998 major magnetic storm. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, no. A11. DOI: 10.1029/2004JA010584.

Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., Kubyshkina M.V., Singer H.J., Russell C.T. Long-term evolution of magnetospheric current systems during storms. *Ann. Geophys.* 2004, vol. 22. pp. 1317–1334.

Greenspan M.E., Hamilton D.C. A test of the Dessler–Parker–Sckopke relation during magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, pp. 5419–5430.

Kalegaev V.V., Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., Kubyshkina M.V., Singer H.J., Russell C.T. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms. *Ann. Geophys.* 2005, vol. 26, no. 2, pp. 523–533.

Kichigin G.N., Sdobnov V.E. Rigidities of geomagnetic cutoff of cosmic rays in the model of bounded magnetosphere with a ring current. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2017, vol. 57, no. 2, pp. 149–153. (In Russian).

Maltsev Y.P., Arykov A.A., Belova E.G., Gvozdevsky B.B., Safargaleev V.V. Magnetic flux redistribution in the storm time magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, pp. 7697–7707.

Ohtani S., Nose M., Rostoker G., Singer H., Lui A.T.Y., Nakamura M. Storm-substorm relationship: Contribution of the tail current to *Dst*. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 21199–21209.

Tyasto M.I., Danilova O.A., Sdobnov V.E. Comparison of cosmic ray cutoff rigidities as calculated with two empirical magnetospheric models for the extreme event of November 2003. *J. Phys.: Conference Ser.* 2013, 409, 012224. DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012224.

Tyasto M.I., Danilova O.A., Sdobnov V.E. Variations in the geomagnetic cutoff rigidity of cosmic rays in the period of magnetospheric disturbances of May 2005: Their correlation with interplanetary parameters. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2011, 75: 808. DOI: 10.3103/S1062873811060414.

URL: <ftp://cr0.irmiran.rssi.ru> (accessed May 5, 2017).

URL: <https://www.solarmonitor.org> (accessed May 5, 2017).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (accessed May 5, 2017).

URL: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2015_06/univ2015_06.html.

Как цитировать эту статью

Кичигин Г.Н., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Параметры токовых систем в магнитосфере по данным наблюдений космических лучей в период магнитной бури в июне 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 3. С. 15–19.

How to cite this article

Kichigin G.N., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. The parameters of the current systems in the magnetosphere according to observations of cosmic rays during the 2015 June magnetic storm. *Solar-Terrestrial Physics*. 2017. Vol. 3, iss. 3. P. 15–19.