

УДК 524.1:528.029.69

ПАРАМЕТРЫ МАГНИТОСФЕРНЫХ ТОКОВЫХ СИСТЕМ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В МАЕ 1998 г.

© 2023 г. А. А. Луковникова¹, В. Е. Сдобнов¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: sdobnov@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

На основе данных мировой сети станций нейтронных мониторов с использованием метода спектрографической глобальной съемки получены параметры магнитосферных токовых систем в событиях в мае 1998 г. В рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли определены параметры токовых систем (токи на магнитопаузе и кольцевой ток во внутренней магнитосфере), а также их вклад в изменения жесткости геомагнитного обрезания и в Dst -индекс в исследуемый период.

DOI: 10.31857/S0367676523701892, EDN: OTSJFQ

ВВЕДЕНИЕ

Магнитосферные токовые системы трансформируются при взаимодействии солнечного ветра и магнитосферы Земли, в результате чего возникают вариации магнитного поля в переходной области, изменения формы и положения магнитопаузы, изменения параметров магнитосферных токовых систем. Взаимосвязь процессов, происходящих в межпланетном пространстве, солнечном ветре и магнитосферных токовых систем, является важным фактором для понимания природы таких геомагнитных возмущений в магнитосфере, как магнитные суббури и бури [1, 2]. Во время магнитной бури происходит резкое усиление кольцевого тока вследствие инжекции заряженных частиц из хвоста магнитосферы [3–5], а также значительное усиление токов хвоста, ионосферных токов и токов на магнитопаузе. Магнитное поле кольцевого тока обеспечивает характерную крупномасштабную структуру вариации измеряемого магнитного поля во время магнитной бури. Понижение напряженности геомагнитного поля, которое описывается Dst -индексом, является характерным проявлением магнитной бури [1, 2]. На вариации Dst -индекса оказывают влияние токи на магнитопаузе (DCF-токи), поперечный ток в хвосте магнитосферы (DT) и кольцевой ток во внутренней магнитосфере (DR) [6]. Изменение соотношения между источниками вариаций Dst -индекса меняется на разных стадиях геомагнитных возмущений, что отражает динамику магнитосферных токовых систем во время

магнитных бурь [7]. Расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе — один из важнейших параметров магнитосферы, который характеризует поджатие магнитопаузы. При внезапных скачках динамического давления СВ изменения этого расстояния приводят к значительным вариациям магнитосферного магнитного поля [1, 2].

Исследование магнитосферных токовых систем во время магнитной бури является актуальной задачей физики магнитосферы [8]. Магнитосферные токовые системы исследуются как по экспериментальным данным [1, 2], так и с привлечением теоретических моделей [9–14]. В нашей работе для получения таких параметров магнитосферных токовых систем, как радиус кольцевого тока (r_c), токов на магнитопаузе (r_m) и Dst -индекса, используются результаты расчетов зависимости изменений жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО) (ΔR_{ob}) от жесткости геомагнитного обрезания (R_c) по данным мировой сети станций космических лучей (КЛ) [1, 2] и изменений ЖГО в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли (ΔR_{cal}) [15].

Цель работы — по результатам расчетов изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания космических лучей исследовать период геомагнитных возмущений в мае 1998 г., определить параметры DR и DCF токовых систем и оценить их вклад в изменения жесткости геомагнитного обрезания и в Dst -индекс.

ДАННЫЕ И МЕТОД

Используя результаты расчетов ΔR_{ob} от R_c по данным мировой сети станций КЛ методом спектрографической глобальной съемки [16] и в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы [15] (ΔR_{cal}) относительно фонового уровня 30 апреля 1998 г., рассчитываются некоторые параметры магнитосферных токовых систем (DR и DCF): радиусы и сила кольцевого тока (r_c), токов на магнитопаузе (r_m) и вклад этих токовых систем в Dst -индекс.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1а–1г, соответственно, представлены данные прямых измерений в межпланетном пространстве скорости СВ, модуля ММП, амплитуды вариаций интенсивности КЛ на станции КЛ Иркутск3 ($R_c = 3.56$ ГВ (относительно 1975 г. [17], высота 3000 м) и вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью $R_c = 4$ ГВ, а также изменения ЖГО (ΔR_c) в Иркутске совместно с Dst -индексом.

В первой декаде мая 1998 г. наблюдались несколько длительных геомагнитных бурь, начавшихся 2 мая и закончившихся 7 мая (рис. 1г), источниками которых послужили корональные выбросы массы типа гало из активной области 8210 [18]. 2 и 6 мая наблюдались наземные возрастания интенсивности КЛ (Ground Level Enhancements 56 и 57). В начале мая к Земле подошли высоко-скоростные потоки: 1 мая наблюдалось возрастание скорости СВ до ~ 600 км/с, модуль ММП составлял ~ 5 – 10 нТл, Dst -индекс изменялся от ~ -13 нТл до ~ 21 нТл. 2 мая скорость СВ увеличилась до СВ ~ 680 км/с, модуль ММП — до ~ 20 нТл, зарегистрирована магнитная буря с $Dst \sim -85$ нТл. Максимальная вариация на станции КЛ Иркутск3 составляла $\sim -4.5\%$. 4 мая во время магнитной бури минимальное значение Dst -индекса было ~ -205 нТл, максимальное значение модуля ММП ~ 40 нТл, скорость СВ в диапазоне ~ 460 – 890 км/с [19–22]. Наблюдалось повышение интенсивности КЛ на низко- и среднеширотных станциях. Так, на станции КЛ Иркутск3 оно составило $\sim 4\%$. На высокоширотных станциях КЛ увеличения скорости счета не наблюдалось. Мы предполагаем, что этот эффект обусловлен уменьшением ЖГО. Расчеты показали, что для низко- и среднеширотных станций ΔR_c составило от ~ -0.2 до ~ -0.4 ГВ. На рис. 1г показаны временные ходы ΔR_c (в Иркутске) и Dst -индекса для геомагнитных бурь 2 и 4 мая. Коэффициент корреляции между ΔR_c и Dst в эти периоды составляет ~ 0.9 .

На рис. 2 приведены зависимости ΔR_c от R_c для разных фаз развития умеренных геомагнитных

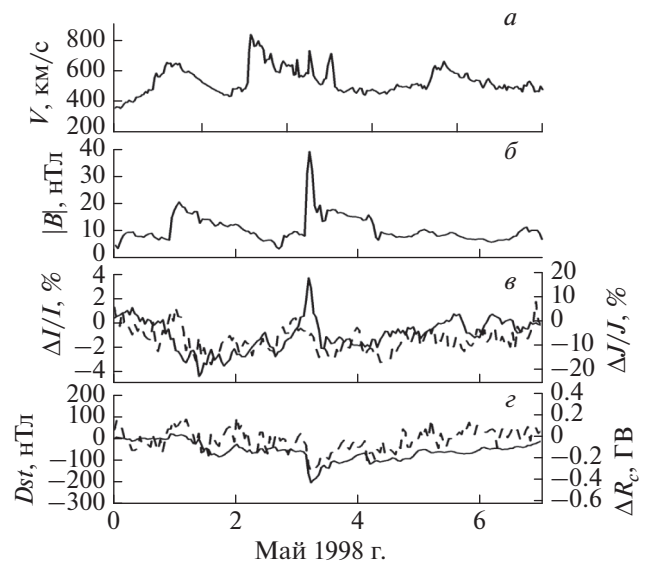


Рис. 1. Скорость СВ (а); модуль ММП (б); амплитуды вариаций интенсивности КЛ на станциях КЛ Иркутск3 (сплошная линия, левая шкала) и вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью $R_c = 4$ ГВ (штриховая линия, правая шкала) (в); изменения ЖГО (ΔR_c) для частиц с $R_c = 4$ ГВ (штриховая линия, правая шкала) совместно с Dst -индексом (сплошная линия, левая шкала) (г).

бурь 2–4 мая 1998 г., полученные по данным мировой сети станций КЛ, а также результаты расчета изменений ЖГО и вклад в изменения ЖГО от кольцевого тока, рассчитанные по модели [15]. Из рис. 2 видно, что изменения ЖГО удовлетворительно согласуются между собой, за исключением отдельных периодов главной фазы геомагнитной бури 4 мая. Это связано с тем, что во время геомагнитной бури, помимо резкого усиления кольцевого тока и токов на магнитопаузе, происходит значительное усиление других токовых систем (например, продольных и ионосферных токов, токов хвоста), что не учитывается в используемой осесимметричной модели ограниченной магнитосферы [1, 2].

В табл. 1 приведены параметры токовых систем, рассчитанные в рамках модели [15] в отдельные моменты рассмотренных событий. Рассчитанные и наблюдаемые Dst -индексы отличаются на величину от нескольких нТл до десятков нТл. Рассчитанные радиусы кольцевого тока r_c и тока на магнитопаузе r_m отражают суммарный вклад нескольких токовых систем, поэтому точнее говорить об эффективных радиусах токовых систем, которые дают вклады в Dst -индекс. Радиусы r_c (в единицах радиуса Земли) составляют для начальной фазы геомагнитной бури 2 мая ~ 4.8 , для главной фазы ~ 2.3 , для фазы восстановления ~ 2.4 . Для геомагнитной бури 4 мая радиусы r_c (в единицах радиуса Земли): для началь-

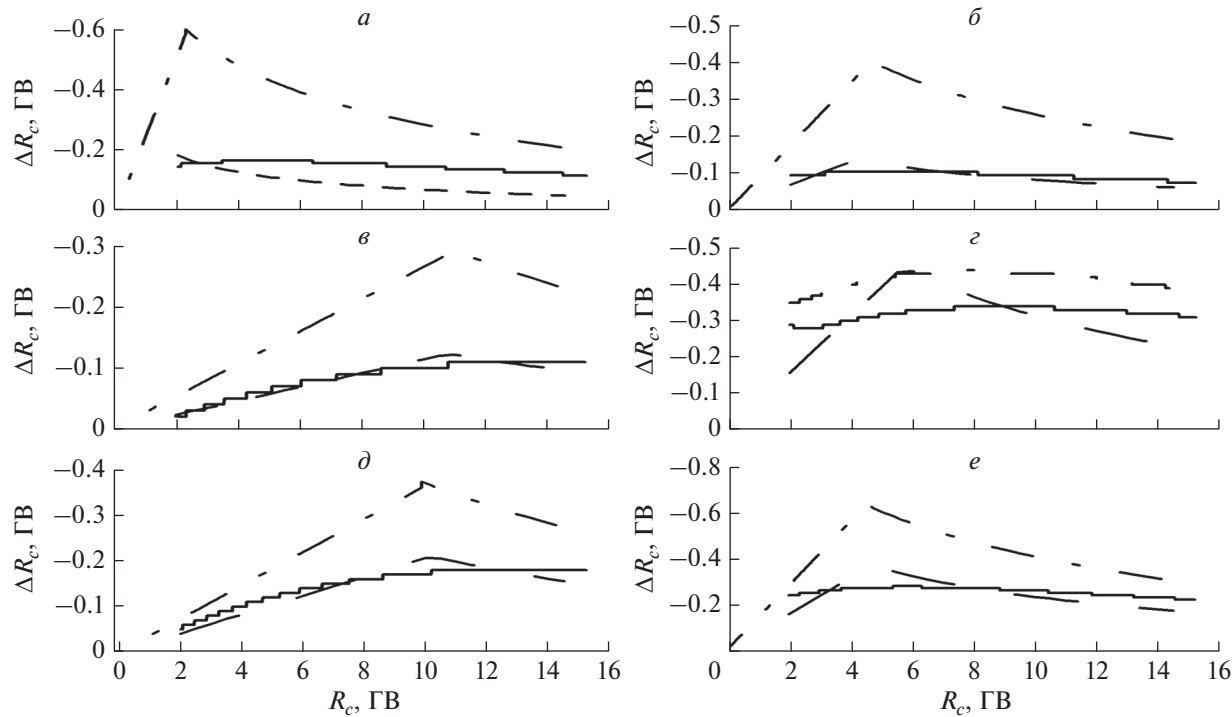


Рис. 2. Зависимость изменения ЖГО от R_c для разных фаз умеренных геомагнитных бурь 2–4 мая 1998 г. Начальная фаза: 08:00 UT 2 мая (а), 22:00 UT 3 мая (б); главная фаза: 17:00 UT 2 мая (в), 05:00 UT 4 мая (г); фаза восстановления: 20:00 UT 3 мая (д), 09:00 UT 4 мая (е). Сплошная линия – результаты, полученные по данным мировой сети станций КЛ методом спектрографической глобальной съемки, штриховая линия – расчет по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током, штрихпунктирная линия – вклад в изменения ЖГО от кольцевого тока, рассчитанный по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы.

ной фазы ~ 3.5 , для главной фазы ~ 3.2 , для фазы восстановления ~ 3.5 . Минимальные радиусы r_c наблюдаются в главной фазе геомагнитной бури и возрастают на фазе восстановления. По параметрам токовых систем в рамках модели [15] вклад эффективного кольцевого тока в изменения ЖГО составляет $\sim 50\text{--}60\%$, в величину Dst -индекса – $\sim 60\text{--}70\%$.

Таблица 1. Параметры токовых систем: радиус кольцевого тока r_c в единицах радиуса Земли, сила кольцевого тока I_c в единицах 10^6 А, расстояние до подсолнечной точки r_m в единицах радиуса Земли, сила тока на магнитопаузе I_m в единицах 10^6 А, рассчитанный Dst -индекс Dst_{cal} (нТл) в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы для разных фаз развития геомагнитных бурь, наблюдаемые значения Dst -индекса Dst_{ob} (нТл)

Фазы геомагнитной бури	Дата и время	Параметры токовых систем					
		r_c	I_c	r_m	I_m	Dst_{cal}	Dst_{ob}
Начальная	2.05.1998 08:00 UT	4.8	12.7	8.9	3.7	–36	–24
	3.05.1998 22:00 UT	3.5	10.4	9.0	1.6	–38	–57
Главная	2.05.1998 17:00 UT	2.3	10.4	8.7	0.73	–64	–85
	4.05.1998 05:00 UT	3.2	13.3	8.4	1.93	–154	–205
Восстановления	3.05.1998 20:00 UT	2.4	10.1	9.1	0.70	–104	–70
	4.05.1998 09:00 UT	3.5	11.4	9.0	1.73	–114	–135

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным наземных измерений на мировой сети станций КЛ в рамках осесимметричной модели токовых систем магнитосферы Земли получены их некоторые характеристики (радиус, сила тока) в периоды геомагнитных возмущений в мае 1998 г. Показано, что повышение интенсивности КЛ 4 мая на низко- и среднеширотных станциях связано с уменьшением ЖГО; вклад эффективного кольцевого тока в изменения ЖГО ~50–60%, в величину *Dst*-индекса — ~60–70%. Изменения ЖГО, рассчитанные по данным мировой сети станций КЛ и в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы удовлетворительно согласуются между собой. Полученные результаты могут быть использованы для количественной оценки параметров некоторых токовых систем в магнитосфере в периоды геомагнитных возмущений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП “Ангара” <http://ckp-gf.ru/ckp/3056/> и Уникальной научной установки “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей” (Сеть СКЛ) [23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кичигин Г.Н., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. // Геомагн. и аэронав. 2018. Т. 58. № 5. С. 608; Kichigin G.N., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. No. 5. P. 586.
2. Кичигин Г.Н., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. // Солн.-земн. физика. 2017. Т. 3. № 3. С. 15; Kichigin G.N., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. // Sol.-Terr. Phys. 2017. V. 3. No. 3. P. 13.
3. Daglis I., Thorne R., Baumjohann W. et al. // Rev. Geophys. 1999. V. 37. No. 4. P. 407.
4. Kozyra J., Liemohn M. // Space Sci. Rev. 2003. V. 109. P. 105.
5. Дайбог Е.И., Кечкемети К., Лазутин Л.Л. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 697.
6. Feldstein Y., Levitin A., Kozyra J. et al. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. Art. No. A11214.
7. Alexeev I., Belenkaya E., Kalegaev V. et al. // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 7737.
8. Greenspan M., Hamilton D. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 5419.
9. Alexeev I., Kalegaev V., Belenkaya E. et al. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 25683.
10. Tsyganenko N., Sitnov M. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. Art. No. A03208.
11. Тясто М.И., Данилова О.А., Сдобнов В.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 611; Tyasto M.I., Danilova O.A., Sdobnov V.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 5. P. 547.
12. Тясто М.И., Данилова О.А., Птицына Н.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 6. С. 861; Tyasto M.I., Danilova O.A., Ptitsyna N.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2005. V. 69. No. 6. P. 967.
13. Тясто М.И., Данилова О.А., Дворников В.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 3. С. 385; Tyasto M.I., Danilova O.A., Dvornikov V.M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. No. 3. P. 367.
14. Тясто М.И., Данилова О.А., Вернова Е.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 7. С. 1031.
15. Кичигин Г.Н., Сдобнов В.Е. // Геомагн. и аэронав. 2017. Т. 57. № 2. С. 132; Kichigin G.N., Sdobnov V.E. // Geomagn. Aeron. 2017. V. 57. No. 2. P. 149.
16. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. No. A11. P. 24209.
17. Inoue A., Wada M., Kondo K. Asymptotic direction in 1975. Cosmic Ray Table No. 1. Tokyo: Institute Phys. Chem. Res., 1983.
18. Xie H., Gopalswamy N., Manoharan P. et al. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. Art. No. A01103.
19. <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/fds1998.html>.
20. <https://www.solarmonitor.org>.
21. <http://cdaw.gsfc.nasa.gov>.
22. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>.
23. <https://ckp-rf.ru/usu/433536>.

Magnetospheric current system parameters during the geomagnetic disturbances in May 1998

A. A. Lukovnikova^a, V. E. Sdobnov^a, *

^a Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia

*e-mail: sdobnov@iszf.irk.ru

Based on the data from the global network of neutron monitors, by using the spectrographic global survey, we obtained the parameters of magnetospheric current systems in the 1998 May events. Within the axisymmetric model for the bounded Earth magnetosphere, we determined the DR (ring current) and DCF (magnetopause currents) parameters for the current systems, as well as their contribution to variations in the rigidity of the geomagnetic cutoff and to the *Dst*-index over the addressed period.