

УДК 524.1

НАЗЕМНОЕ ВОЗРАСТАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ 28 ОКТЯБРЯ 2003 г.: СПЕКТРЫ И АНИЗОТРОПИЯ

© 2019 г. М. В. Кравцова¹, *, 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: rina@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

По данным наземных и спутниковых наблюдений интенсивности космических лучей (КЛ) на мировой сети станций методом спектрографической глобальной съемки, разработанном в Институте солнечно-земной физики СО РАН, исследованы вариации жесткостного спектра и анизотропия КЛ в период наземного возрастания интенсивности КЛ (GLE) 28 октября 2003 г. Определены жесткостные спектры КЛ в отдельные периоды исследуемого события. Показано, что ускорение протонов в период этого GLE наблюдалось до жесткости ~10–14 ГВ, а дифференциальные жесткостные спектры КЛ во время рассматриваемого события не описываются ни степенной, ни экспоненциальной функцией от жесткости частиц. На основе проведенного анализа установлено, что в момент GLE Земля находилась в петлеобразной структуре межпланетного магнитного поля.

DOI: 10.1134/S0367676519050193

ВВЕДЕНИЕ

Событие на Солнце 28 октября 2003 г. обсуждалось во многих работах, например [1–5]. Мы решили внести свой вклад в изучение некоторых характеристик наземного возрастания интенсивности космических лучей (КЛ) (GLE65), продолжая систематическое изучение методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [6] серии GLE в 23 цикле солнечной активности (1996–2008 гг.), поскольку по ним имеются обширные базы данных наблюдений наземной сети, космических аппаратов и т.д.

Вспышка на Солнце 28.10.2003 г., вызвавшая GLE65, относится к экстремальным событиям. Максимальное значение потока протонов составило 29500 pfu при энергии протонов >10 МэВ. Вспышка произошла в активной области 10486 (координаты 16° S, 08° E) и имела балл X17.2/4B [7]. Начало вспышки наблюдалось в 09:51 UT, максимум – в ~11:10 UT. Согласно выводам работы [5] вспышка 28 октября 2003 г. состоит из комбинации трех энерговыделений в различных точках активной области, которые связаны с изменением магнитной полярности.

Начиная с 11:11 UT, вспышка сопровождалась всплеском II типа в метровом радиодиапазоне (m-Туре II), а в 11:30 UT в поле зрения коронографа LASCO/SOHO [7] попал самый высокоско-

ростной корональный выброс массы (КВМ) типа полного гало ($V = 2459 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$), детально изученный в работе [8]. Наличие всплеска II типа является показателем того, что КВМ способен генерировать сильную ударную волну из нижней части солнечной короны в межпланетную среду и является типичным для событий GLE [9].

28 октября 2003 г. ~12:00 UT мировой сетью станций КЛ было зарегистрировано повышение интенсивности нейтронной компоненты КЛ (GLE65). Особенностью этого события является, во-первых, что оно произошло на фазе восстановления форбуш-понижения, начавшегося после геомагнитной бури 28 октября 2003 г.; во-вторых, пик возрастания интенсивности КЛ на станциях мировой сети вследствие сильной анизотропии имеет сдвиг. Так, на высокоширотных станциях сдвиг наблюдается с задержкой относительно момента генерации (12:00 UT) за исключением станции Мак-Мердо (высота наблюдения 48 м, $R_c = 0.0$ ГВ). К примеру, на среднеширотной станции Москва (высота наблюдения 200 м, $R_c = 2.39$ ГВ) и низкоширотной станции Цумеб (высота наблюдения 1240 м, $R_c = 9.29$ ГВ) – раньше, чем на высокоширотной станции Апатиты (высота наблюдения 177 м, $R_c = 0.6$ ГВ). Примечательно, что на станции Цумеб возрастание интенсивности КЛ наблюдалось одновременно с регистрацией ней-

тронов прибором СОНГ на космическом аппарате (КА) КОРОНАС [1].

Целью настоящей работы является получение энергетических спектров в широком диапазоне энергий и анизотропии КЛ в период GLE65.

ДАННЫЕ И МЕТОД

Для анализа GLE в нерелятивистском диапазоне энергий использовались данные измерений протонов на орбите Земли КА GOES-11 [10], при релятивистских энергиях — результаты обработки усредненных за часовые интервалы данные наземных измерений на мировой сети нейтронных мониторов (44 станции) [11].

Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 12 октября 2003 г. Выбор спокойного периода обусловлен тем, что в этот период по сравнению с периодом, когда наблюдалось GLE, электромагнитная обстановка в межпланетном пространстве и геомагнитная обстановка были спокойными, а спектр галактических КЛ наименее модулирован.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Из рис. 1а видно, что относительно выбранного уровня отсчета амплитуда эффекта в часовом осреднении на высокоширотной станции Мак-Мердо (высота наблюдения 48 м, $R_c = 0.0$ ГВ) составляет ~16%, на среднеширотной станции Иркутск (высота наблюдения 465 м, $R_c = 3.66$ ГВ) — ~4% с максимумом смещенным на 1 ч относительно начала GLE (12:00 UT), а на низкоширотной станции Цумеб (высота наблюдения 1240 м, $R_c = 9.29$ ГВ) амплитуда эффекта менее 1%. Увеличение амплитуды вариаций КЛ на станции Цумеб говорит о том, что на орбиту Земли пришли протоны, ускоренные до жесткостей свыше ~9 ГВ.

Начиная с 12:00 UT 28 октября (см. рис. 1б), потоки протонов на орбите Земли в диапазонах 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ выросли на ~1.5–2 порядка по сравнению с потоками частиц в 11:00 UT.

На рис. 1в видно, что поток протонов с жесткостью 4 ГВ на границе магнитосферы Земли в 12:00 UT увеличился на ~26% относительно потока в 11:00 UT. Как следует из графиков (см. рис. 1з, 1д), в отдельные часы 28.10.2003 г. наблюдается сильная анизотропия КЛ с амплитудами ~11–22% для первой сферической гармоники питч-угловой анизотропии (A_1). Максимальные амплитуды A_1 для частиц с жесткостью 4 ГВ наблюдались в 02:00 UT (~19%), 07:00 UT (~17%), 12:00 UT (~22%), а второй сферической гармоники питч-угловой анизотропии (A_2) для частиц той же жесткости — в 05:00–06:00 UT (~15%) и 12:00 UT (~17%). При входе и выходе Земли в структуры,

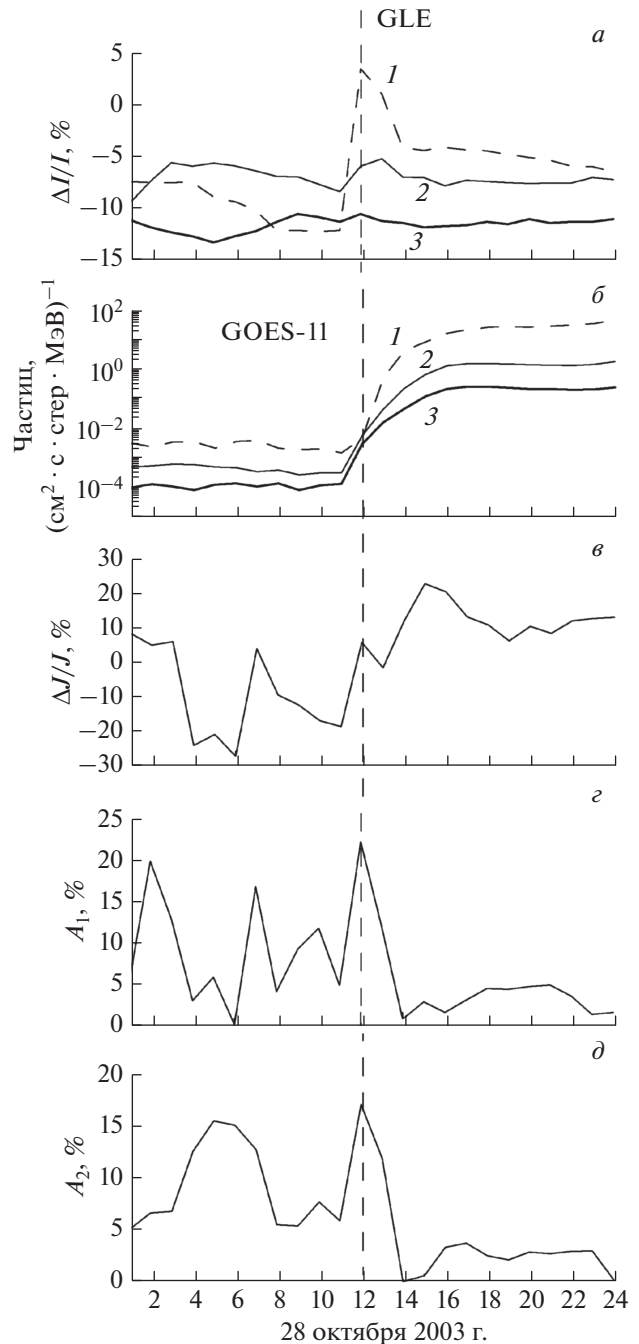


Рис. 1. а — Временной ход амплитуд вариаций нейтронной компоненты КЛ на отдельных станциях мировой сети (1 — Мак-Мердо ($R_c = 0.0$ ГВ), 2 — Иркутск ($R_c = 3.66$ ГВ), 3 — Цумеб ($R_c = 9.29$ ГВ)); б — временной ход интенсивности протонов, зарегистрированных на КА GOES-11 в трех энергетических диапазонах (1 — 40–80 МэВ, 2 — 80–165 МэВ, 3 — 165–500 МэВ); в — вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 ГВ; з, д — амплитуды первой A_1 и второй A_2 гармоник питч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ.

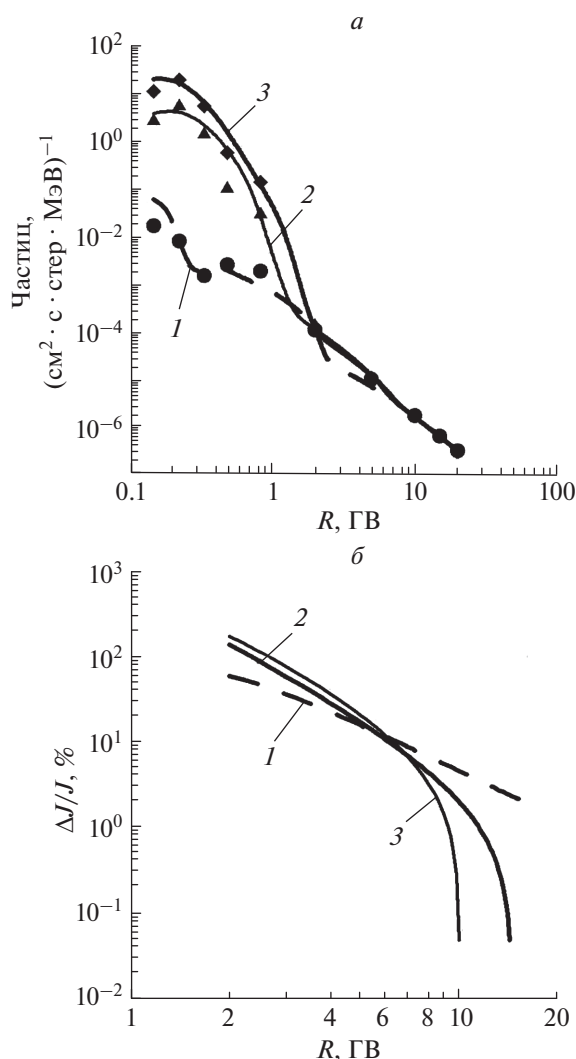


Рис. 2. *a* – Дифференциальные жесткостные спектры КЛ (кривые – результаты расчетов, значки – данные наблюдений); *б* – жесткостные спектры вариаций КЛ в отдельные моменты времени развития GLE65 (1 – 12:00 UT, 2 – 14:00 UT, 3 – 16:00 UT).

подобные КВМ, наблюдается увеличение амплитуды первой гармоники пичч-углового распределения, а возрастание амплитуды второй гармоники пичч-углового распределения указывает на наличие в ММП петлеобразной структуры [12]. В работах [2, 3] упоминается о петлеобразной структуре ММП 28 октября 2003 г. Однако в работе [2] из-за отсутствия независимых доказательств авторы только предположили, что аномальное распространение частиц связано с расположением Земли внутри замкнутой магнитной петли при появлении GLE.

Используя выражение для жесткостного спектра КЛ, полученного в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями геиосферы [12], по данным измерений на КА

GOES-11 и мировой сети станций КЛ нами были рассчитаны дифференциальные жесткостные спектры КЛ на орбите Земли. Из рис. 2*a* видно, что используемый вид спектра хорошо описывает наблюдаемую зависимость интенсивности КЛ от их жесткости. Дифференциальный жесткостный спектр солнечных КЛ в этот период не описывается ни степенной, ни экспоненциальной функцией от жесткости частиц в широком диапазоне жесткостей. На рис. 2*б* представлены жесткостные спектры вариаций КЛ в последовательные моменты времени развития GLE65 относительно уровня 10:00–11.00 UT, принятого в базе данных [13]. В начальный момент исследуемого события (в 12.00 UT) спектр вариаций близок к степенному с показателем $\gamma \sim -1.73$. В последующие моменты времени спектры вариаций КЛ не являются степенными. Максимальная жесткость ускоренных протонов в 14:00 UT (спустя два часа после GLE65) по результатам обработки данных мировой сети методом СГС составила ~ 14 ГВ. В последующие моменты этого события ускоренные частицы с жесткостью выше ~ 8 – 10 ГВ не наблюдаются.

28 октября 2003 г. повышенный поток частиц в 12:00 UT (в момент регистрации GLE $\sim 46\%$) и 14:00 UT идет практически из одного направления $\psi \sim 20^\circ$, $\lambda \sim -30^\circ$, т.е. присутствует ярко выраженная первая гармоника пичч-угловой анизотропии. В 16:00 UT наблюдается двунаправленная анизотропия с повышенной интенсивностью из направлений $\sim 20^\circ$, $\sim 0^\circ$ и $\sim 185^\circ$, $\sim 15^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы: дифференциальный жесткостный спектр солнечных КЛ в диапазоне жесткостей от ~ 0.2 до 20 ГВ в этот период не описывается ни степенной, ни экспоненциальной функцией от жесткости частиц, а распределение КЛ по направлениям прихода к Земле динамично во времени; в начальной стадии события (12:00 UT) спектр вариаций близок к степенному с показателем $\gamma \sim -1.73$, а в последующие моменты спектры вариаций КЛ не являются степенными; в период GLE65 (28 октября 2003 г.) ускорение протонов произошло до жесткостей ~ 10 – 14 ГВ; в исследуемый период Земля находилась в петлеобразной структуре ММП.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы Фундаментальных научных исследований П.16. Результаты получены на оборудовании Центра коллективного пользования “Ангара” <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> и Уникальной научной установки “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др.* // Косм. исслед. 2004. Т. 42. № 5. С. 453; *Veselovsky I.S., Panasyuk M.I., Bogomolov A.V. et al.* // Cosmic Res. 2004. V. 42. № 5. P. 435.
2. *Bieber J.W., Clem J., Evenson P. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L. 03S02.
3. *Вашенюк Э.В., Мирошниченко Л.И., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 6. С. 808; *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B., Miroshnichenko L.I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2005. V. 69. № 6. P. 905.
4. *Gopalswamy N., Xie H., Yashiro S. et al.* // Space Sci. Rev. 2012. V. 171. № 1–4. P. 23.
5. *Schrijver C.J., Hudson H.S., Murphy R.J. et al.* // Astrophys. J. 2006. V. 650. P. 1184.
6. *Dvornikov V.M., Sdobnov V.E.* // IJGA. 2003. V. 3. № 3. P. 217.
7. <https://cdaw.gsfc.nasa.gov>.
8. *Manchester W.B., Vourlidas A., Toth G. et al.* // Astrophys. J. 2008. V. 684. P. 1448.
9. *Gopalswamy N.* in: *Rucker H.O., Kurth W.S., Lوران P., Fischer G.* (Eds.) Planetary Radio Emissions VII (PRE VII) (Austrian Acad. Sci. Press. Vienna: Springer, 2011. 325 p.
10. https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/.
11. <http://www.nmdb.eu>.
12. *Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е.* // Геомагн. и аэрон. 2013. Т. 53. № 4. С. 457; *Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E.* // Geomagn. Aeron. 2013. V. 53. № 4. P. 430.
13. http://cr.izmiran.ru/dbs_unu.html.