

ОСОБЕННОСТИ МОДУЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОКТЯБРЕ – НОЯБРЕ 2003 Г

Сдобнов В.Е. (sdobnov@iszf.irk.ru)

Абстракт

По данным мировой сети станций космических лучей методом спектрографической глобальной съемки исследованы форбуш-эффекты 29-31 октября и 20-21 ноября 2003 г.

Приведены спектры вариаций космических лучей в эти периоды, а также показатели спектра вариаций при аппроксимации спектра степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ на разных фазах развития форбуш-эффекта. Показано, что показатели спектра вариаций космических лучей 20-21 ноября больше, чем для события 29-31 октября 2003 г.

Наблюдаемая высокая степень анизотропии в угловом распределении КЛ в периоды форбуш-эффектов в октябре – ноябре 2003 г, изменчивость ее фазы свидетельствует, во-первых, о выносе магнитных облаков, во-вторых, – о высокой степени регулярности ММП в этих структурах, а наличие двунаправленной анизотропии говорит о петлеобразной структуре ММП в период события 29 октября 2003 г.

Введение

Период с октября по ноябрь 2003 г. оказался богатым по числу и мощности событий, зарегистрированных наземными детекторами космических лучей (КЛ). Форбуш-понижение 29 октября и геомагнитный эффект 20 ноября 2003 г. являются самыми большими для всей истории наземных наблюдений КЛ.

28 октября в активной области 10486 (координаты $16^{\circ} \text{ S } 08^{\circ} \text{ E}$) произошла вспышка X17.2/4B, которая сопровождалась мощными радиовсплесками и ускорением заряженных частиц до энергии в несколько ГэВ. Поток протонов с энергией больше 10 МэВ, измеренный на спутниках GOES, достигал максимального значения 29500 pfu ($1 \text{ pfu} = \text{частиц} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$). Во время вспышки наблюдался очень большой, плотный и быстрый выброс солнечного вещества со скоростью более 2100 км/с. Межпланетная ударная волна достигла Земли 29 октября в 06:13 UT, всего через 19 ч после вспышки. Это самый быстрый приход межпланетного возмущения с 1972 г. После прихода ударной волны началась исключительно большая магнитная буря. Dst-индекс составил -401 нТл. Амплитуда форбуш-понижения, наблюдаемая нейтронным монитором в Апатитах, составила -29 - -30% .

18 ноября на восточном лимбе произошла вспышка M4 в группе 10486 (10508). В это же время в области 10501 в центре диска произошли две продолжительные вспышки (M3.2/2N; M3.9), сопровождавшиеся мощными выбросами вещества, которые оказались чрезвычайно эффективны. 20 ноября на Земле началась очень большая магнитная буря, связанная со вспышками 18 ноября (как минимум, с двумя центральными, а возможно со всеми тремя), Dst -индекс понизился до -465 нТл. Наблюдаемая нейтронным монитором в Апатитах амплитуда форбуш-понижения составила -12 - -14% .

Хотя вспышки на Солнце 28 октября и 18 ноября 2003 г. произошли в одних и тех же активных областях Солнца, событие 20 ноября 2003 г. существенно отличается от событий в конце октября 2003 г. Событие 20 ноября 2003 г. ни в жестком рентгеновском, ни в гамма, ни в микроволновом излучении, ни в потоках протонов, ни в параметрах СВ не достигло величин, наблюдавшихся 29 – 31 октября 2003 г.

Гречнев В.В. и др [1] считают, что в результате вспышек на Солнце в середине ноября в межпланетном пространстве образовалось магнитное облако в виде сферомака, не связанного с Солнцем, в которое попала Земля 20 ноября.

Ранее нами было показано [2], что 29 октября Земля находилась в области с усиленной напряженностью ММП, что послужило причиной гигантского форбуш-эффекта. Об этом свидетельствуют и повышенные значения амплитуд двунаправленной анизотропии, являющиеся признаком прохождения КВМ с соответствующей петлеобразной структурой ММП.

В событии 20 ноября, при котором в межпланетном пространстве наблюдалось возрастание модуля ММП почти до 60 нТл, повышение амплитуд двунаправленной анизотропии в КЛ не наблюдалось. Это можно объяснить в рамках используемой нами концепции модуляции КЛ крупномасштабными электромагнитными полями гелиосферы. Если не сформирована петлеобразная структура ММП в магнитной ловушке, то эффект повышения амплитуды второй гармоники пичч-угловой анизотропии будет отсутствовать [3], что наблюдается в данном событии и подтверждает выводы [1].

В данной работе рассматривается проявление разных структур ММП в конце октября и 20 ноября 2003 г. в поведении интенсивности КЛ.

Данные и метод

Для анализа использовались усредненные за часовые интервалы данные наземных наблюдений интенсивности частиц на мировой сети станций нейтронных мониторов (42 станции), исправленные на барометрический эффект. Обработка данных мировой сети станций произведена методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [4, 5],

позволяющего получать информацию об ориентации ММП, изменениях жесткости геомагнитного обрезания, вариациях анизотропии и жесткостного спектра КЛ. Амплитуды модуляции отсчитывались от спокойного уровня 12 октября 2003 г.

Результаты анализа

В результате расчетов по данным мировой сети станций КЛ методом СГС показано, что 29 октября 2003 г. максимальное понижение интенсивности частиц с жесткостью 4 ГВ на границе магнитосферы составило $\sim -55\%$, а интенсивность частиц с жесткостью 10 ГВ достигла величины $\sim -50\%$ от фонового уровня, изменение жесткости геомагнитного обрезания в пункте с пороговой жесткостью $R_c=4$ ГВ составило ~ -3 ГВ. 20 ноября 2003 г. интенсивность частиц с жесткостью 4 ГВ и 10 ГВ достигли величины $\sim -36\%$ и $\sim -22\%$ от фонового уровня, соответственно, а изменение жесткости геомагнитного обрезания в пункте с пороговой жесткостью $R_c=4$ ГВ составило ~ -1.5 ГВ. Максимальные возрастания первой гармоники A_1 наблюдались в начале 29.10 ($\sim 80\%$), во второй половине 1.11 ($\sim 60\%$) Максимальные амплитуды двунаправленной анизотропии A_2 наблюдались в конце 29 октября ($\sim 50\%$) и в конце 31 октября ($\sim 30\%$) [2].

На рис. 1 приведены спектры вариаций КЛ на орбите Земли в разные стадии развития форбуш-эффектов (спад интенсивности, фаза максимума эффекта, фаза восстановления). Видно, что 29 октября максимум понижения смещается от жесткостей $\sim 8 - 9$ ГВ до $\sim 4 - 5$ ГВ, а затем перемещается обратно в диапазон $\sim 8 - 9$ ГВ. 20 ноября максимум понижения смещается от жесткостей $\sim 6 - 7$ ГВ до $\sim 3 - 4$ ГВ, а затем перемещается обратно в диапазон $\sim 7 - 8$ ГВ. При этом изменяется показатель (γ) спектра вариаций при аппроксимации спектра степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ. В таблице 1 приведены усредненные значения этого параметра для разных фаз развития эффекта.

Таблица 1

Период	γ (жесткостной диапазон 10 – 50 ГВ)		
	Фаза спада	Фаза Минимума	Фаза восстановления
29.10.2003	-0,698	-0,832	-0,722
20.11.2003	-0,818	-0,934	-0,805

Из таблицы видно, что в обоих случаях на фазе спада и фазе восстановления спектр вариаций КЛ более жесткий, чем спектр вариаций в максимальной фазе развития форбуш-эффекта. Следует отметить, что на всех фазах развития события спектр вариаций КЛ 20 ноября более мягкий, чем в событии 29 октября.

Мы сопоставили часовые значения показателя (γ) спектра вариаций при аппроксимации спектра степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ в периоды максимальных возмущений в течение 24 часов 29 октября и 20 - 21 ноября 2003 г. с амплитудой вариаций КЛ с жесткостью 4 ГВ на орбите Земли. Результаты представлены на рис. 2. Видно, что амплитуда вариаций КЛ с жесткостью 4 ГВ хорошо коррелирует с показателем (γ) спектра вариаций при аппроксимации спектра степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ. Коэффициенты корреляции составляют ~ 0.926 и ~ 0.924 , соответственно.

На рис. 3. представлены относительные изменения интенсивности КЛ с $R = 4$ ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени (спад интенсивности, фаза максимума эффекта, фаза восстановления). По оси абсцисс отложены значения долготного угла ψ , а по оси ординат – широтного угла λ . Цифры на оси Z указывают значения амплитуд вариаций интенсивности частиц в процентах к фоновому уровню.

Как следует из рис. 3, 29 октября на начальной фазе форбуш-эффекта в 01.00 UT доминировала первая гармоника. Интенсивность КЛ была понижена из направления $\psi \sim 15^\circ$, $\lambda = \sim -50^\circ$ (относительно линии Земля–Солнце). В моменты времени 20.00 и 23.00 UT 29 октября 31.10.03 г. доминировала вторая гармоника с фазой $\psi \sim 90^\circ$, $\sim 130^\circ$ и $\lambda = \sim 30^\circ$ и $\sim 30^\circ$, соответственно. Интенсивность из этих направлений была выше минимально наблюдаемой интенсивности на 25–50 %. В 01.00 UT интенсивность КЛ из северной полусферы была выше, чем из южной полусферы, в 20.00 и 23.00 UT ситуация перевернулась на противоположную.

Для события 20 ноября доминировала первая гармоника. На рис. 3 видно, что в приведенные моменты времени интенсивность была понижена из направлений $\psi \sim 90^\circ$, $\sim 90^\circ$, $\sim 30^\circ$; $\lambda \sim 0^\circ$, $\sim 30^\circ$, $\sim -15^\circ$, соответственно.

Как в событии 29 сентября, так и 20 -21 ноября 2003 г. имели место сильные геомагнитные бури со значениями Dst-индекса около ~ -400 нТл. При этом V_z составляющая ММП изменялась от положительных значений к отрицательным и достигала 29 октября значений ~ -25 нТл за ~ 12 часов, то 20 – 21 ноября V_z составляющая ММП достигла значений ~ -45 нТл за ~ 4 часа. Изменения пороговой жесткости геомагнитного обрезания в пункте с пороговой жесткостью 4 ГВ 29 сентября не коррелируют с Dst вариацией, а 20 – 21 ноября наблюдается высокая корреляция (коэффициент корреляции ~ 0.945) между этими величинами. Максимальное изменение пороговой жесткости геомагнитного обрезания в пункте с пороговой жесткостью 4 ГВ в

эти периоды составило ~ 1 ГВ. Максимальное понижение пороговой жесткости геомагнитного обрезания 20 ноября произошло через 2 часа после того, как на орбите Земли наблюдалось максимальное понижение интенсивности КЛ с жесткостью 4 ГВ

Выводы

1. Наблюдаемая высокая степень анизотропии в угловом распределении КЛ в периоды форбуш-эффектов в октябре – ноябре 2003 г, изменчивость ее фазы свидетельствует, во-первых, о выносе магнитных облаков, во-вторых, – о высокой степени регулярности ММП в этих структурах, а наличие двунаправленной анизотропии говорит о петлеобразной структуре ММП в период события 29 октября 2003 г.
2. Спектры вариаций в событии 20 – 21 ноября 2003 г., когда Земля попала в магнитное облако в виде сферомака, значительно мягче спектров вариаций в период события 29 октября 2003 г.
3. Амплитуда вариаций КЛ с жесткостью 4 ГВ хорошо коррелирует с показателем (γ) спектра вариаций при аппроксимации спектра степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ.
4. Изменения пороговой жесткости геомагнитного обрезания 29 октября 2003 г не коррелируют с Dst-индексом, в то время как 20 -21 ноября наблюдается высокая степень корреляции между этими величинами, а максимум понижения пороговой жесткости геомагнитного обрезания произошел на 2 часа позднее максимального понижения интенсивности КЛ на орбите Земли.

Работа выполнялась при поддержке программы Президиума РАН «Физика Нейтрино и Нейтринная Астрофизика» в рамках проекта «Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным и стратосферным наблюдениям», а также поддержке Минобрнауки: ГК № 14.518.11.7047 и Соглашение на предоставление гранта в форме субсидии № 8407.

Литература

1. Grechnev V.V., Uralov A.M., Chertok I.M. et al. Filament Eruptions, CMEs, and Shocks in the 18 November 2003 Event and Causes of the 20 November Geomagnetic Superstorm. IV. Enigmatic Source of the Geomagnetic Superstorm // Solar Physics
2. Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Diagnostics of the Electromagnetic Characteristics of the Interplanetary Medium Based on Cosmic Ray Effects // Geomagnetism and Aeronomy. 2013. V. 53, N 4. P. 430–440.
3. Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Юдина М.В. Вариации жесткого спектра и анизотропии космических лучей при спорадических явлениях в гелиосфере в октябре-ноябре 2003 г. // Космические исследования, 2004, Т.42, №6, С.645-652.
4. Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Сергеев А.В. Метод спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций интенсивности космических лучей межпланетного и магнитосферного происхождения // Сб. «Вариации космических лучей и исследования космоса». – М.: ИЗМИРАН, 1986. С. 232–237.
5. Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Модификация метода спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания // Известия АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55, № 10. С. 1988–1991.

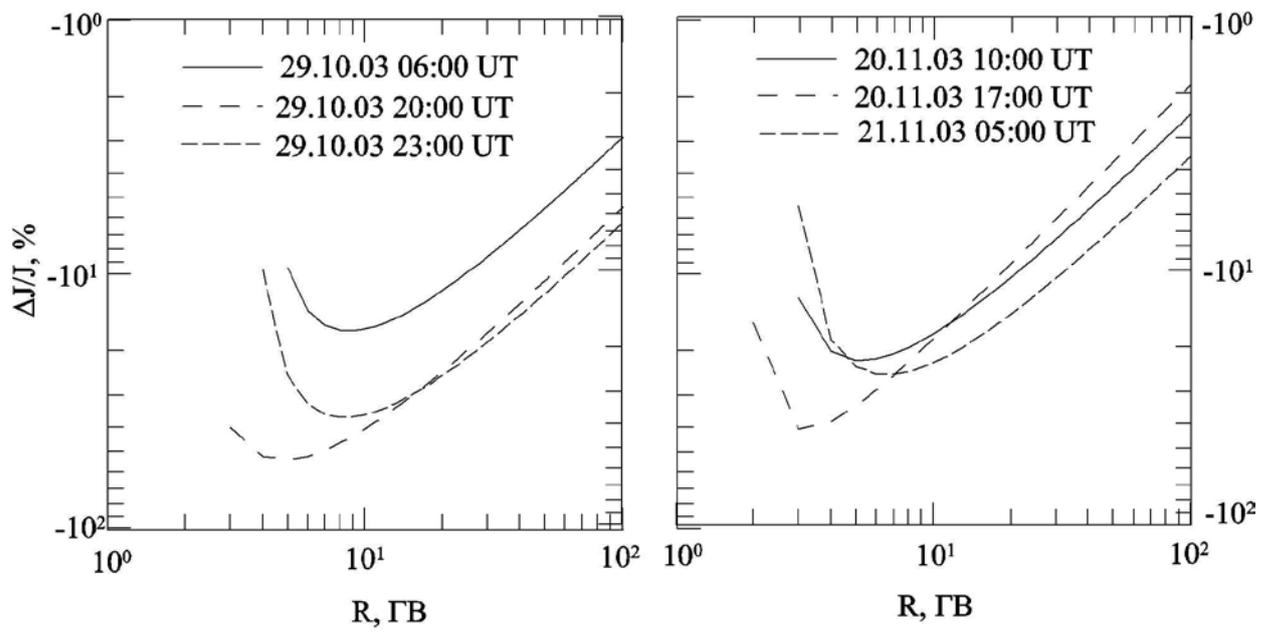


Рис. 1. Спектры вариаций КЛ

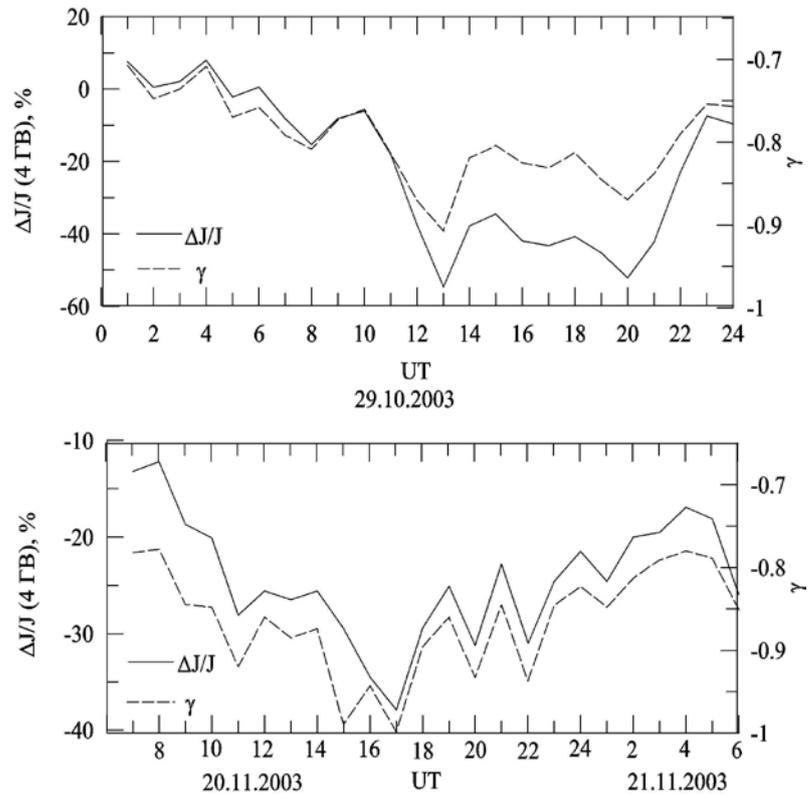


Рис. 2. Временной ход амплитуд вариаций КЛ с жесткостью 4 ГВ и показателя (γ) спектра вариаций при аппроксимации спектра степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей от 10 до 50 ГВ.

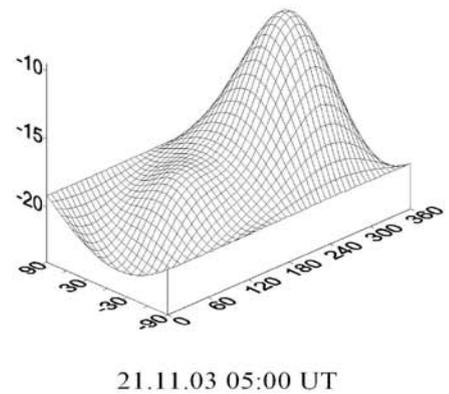
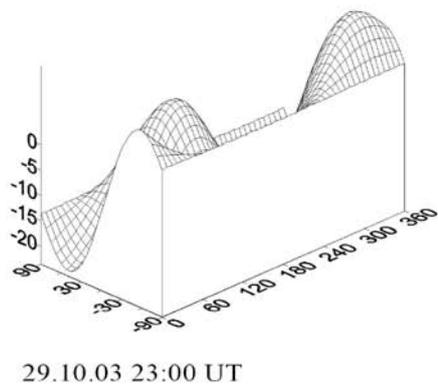
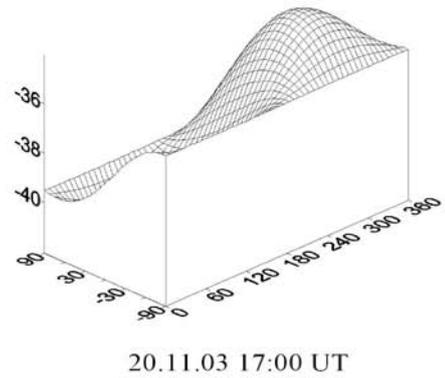
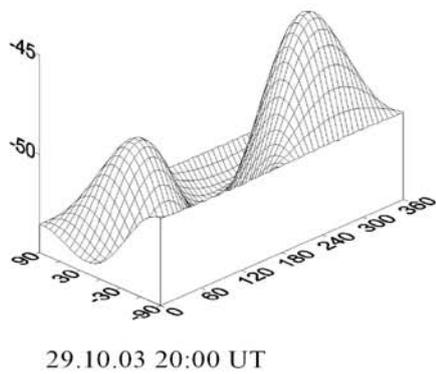
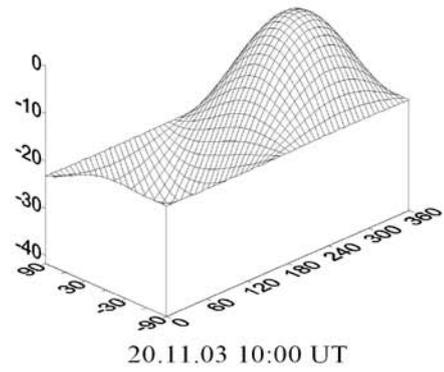
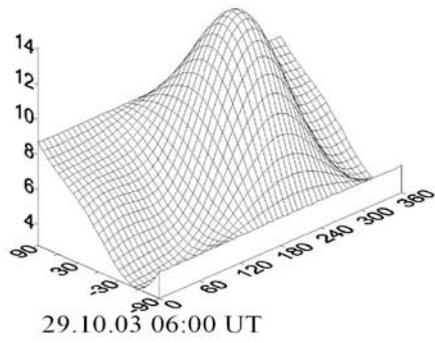


Рис.3. Относительные изменения интенсивности К1 (%) с жесткостью $R = 4$ ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени.