

УДК 539.163

ВАРИАЦИИ ЖЕСТКОСТНОГО СПЕКТРА И АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРИ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСАХ МАССЫ

В.М. Дворников, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов

VARIATIONS OF RIGIDITY SPECTRUM AND COSMIC RAY ANISOTROPY DURING CORONAL MASS EJECTIONS

V.M. Dvornikov, M.V. Kravtsova, V.E. Sdobnov

По данным наземных и спутниковых измерений интенсивности космических лучей (КЛ) исследованы вариации их жесткостного спектра и анизотропии при корональных выбросах массы на фазе спада и вблизи минимума 23 цикла солнечной активности. На основе анализа полученных результатов показано, что понижение интенсивности релятивистских КЛ, как правило, сопровождается возрастанием амплитуды второй гармоники в распределении частиц по питч-углам в межпланетном магнитном поле (ММП), возрастанием интенсивности низкоэнергичных КЛ, возрастанием модуля ММП до определенных значений и изменением направления поля на противоположное. Дана интерпретация всему комплексу наблюдаемых явлений.

According to ground-based and satellite observations of an intensity of cosmic rays (CR) their variations of rigidity spectrum and anisotropy are researched during coronal mass ejections at the decay phase and near to the minimum of 23 solar activity cycle. On the basis of the analysis of the results obtained, it is shown that a decrease of relativistic CR intensity usually is accompanied by an increase of second harmonic amplitude in particle distribution with pitch angle in the interplanetary magnetic field (IMF), by an increase of intensity of low-energetic CRs and of the IMF module up to certain values, as well as by a change of the field direction to the opposite one. The interpretation is given to the whole complex of the observable phenomena.

В настоящее время существуют два подхода к проблеме модуляции космических лучей (КЛ) в гелиосфере. Согласно первому подходу, модуляция обусловлена «выносом» КЛ мелкомасштабными магнитными неоднородностями, «вмороженными» в плазму солнечного ветра (СВ), диффузией их вдоль спирального межпланетного магнитного поля (ММП) и, как полагают, адиабатическими потерями [1]. Амплитуда модуляции в линейном приближении пропорциональна скорости СВ, размеру области модуляции и обратно пропорциональна коэффициенту диффузии. Анизотропия в распределении частиц по направлениям прихода мала и в основном имеет токовую структуру.

В соответствии со вторым подходом предполагается, что ММП в большей степени структурировано, чем турбулизовано. Определяющим фактором в модуляции КЛ является изменение их энергии при движении в регулярных электромагнитных полях гелиосферы. Изменение же энергии, в свою очередь, определяется величиной и природой электрических полей межпланетной среды и временем взаимодействия частиц с этими полями [2], которое в значительной мере определяется структурами ММП типа «магнитных ловушек». Анизотропия КЛ может достигать значительной величины и, наряду с первой, иметь более высокие гармоники [3].

Для решения вопроса об адекватности того или иного подхода в предлагаемой работе исследуются эффекты в КЛ при корональных выбросах массы (КВМ) и их взаимосвязь с вариациями параметров межпланетной среды.

Данные и метод

Для анализа использовались данные наблюдений интенсивности протонов, полученные на спутнике GOES-11 в энергетических диапазонах 4–9, 9–15, 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ [4], и данные о вариациях интенсивности КЛ более высоких энер-

гий, полученные методом спектрографической глобальной съемки (СГС). Метод СГС позволяет получать информацию о вариациях углового и энергетического распределения первичных КЛ за пределами магнитосферы Земли, а также об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обреза за каждый час наблюдений [5].

Для определения параметров жесткостного спектра КЛ по данным наземных и спутниковых наблюдений использовался метод, изложенный в работе [6]. На основе данных методов были проанализированы вариации параметров жесткостного спектра и анизотропии КЛ за период 2003–2005 гг.

Результаты анализа

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты исследования событий в октябре–ноябре 2003 г. (сверху вниз): временные профили интенсивности КЛ с $R=0.108$, 0.223 и 5 ГВ (линия – расчет, треугольники – данные наблюдений), параметров жесткостного спектра КЛ: R_0 (характеризует размер структур ММП с нестационарными электромагнитными полями), $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$ (характеризуют напряженность крупномасштабного спиралевидного ММП и напряженность магнитного поля выброса корональной массы (ВКМ) соответственно), α (отражает напряженность локальных поляризационных электрических полей), β (отражает временные вариации напряженности мелкомасштабных магнитных полей гелиосферы). На графике $\Delta\epsilon_2$ (жирной кривой) приведены значения амплитуды двунаправленной анизотропии.

Обсуждение результатов и выводы

Анализируя поведение параметров $\Delta\epsilon_1$ и $\Delta\epsilon_2$ (см. рис. 1) в период экстремальных событий в октябре–ноябре 2003 г. следует заключить, что 29 октября Земля попала в область с усиленной напряженностью ММП, что послужило причиной гигантского форбуш-эффекта. Об этом свидетельствуют и

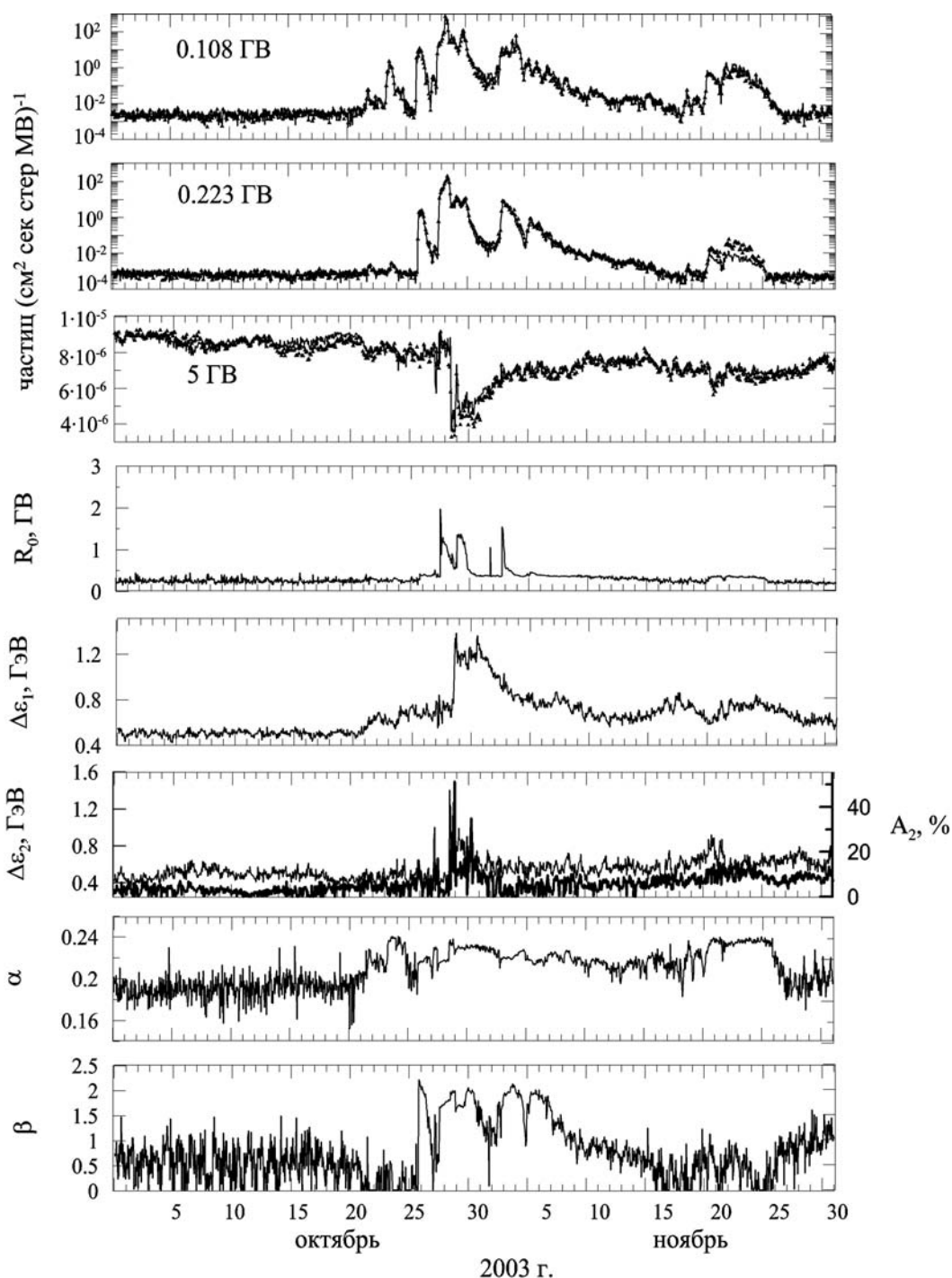


Рис.1.

повышенные значения амплитуд двунаправленной анизотропии, являющиеся признаком прохождения ВКМ с соответствующей петлеобразной структурой ММП [2]. В событии же 20 ноября, при котором в межпланетном пространстве наблюдалось возрастание модуля ММП почти до 60 нТл, параметры практически не отреагировали на такое повышение. Это объясняется тем обстоятельством, что в рамках используемой концепции эффекты потери энергии высокоэнергичных частиц, а следовательно и понижение их интенсивности, будут наблюдаться только в том случае, когда частицы, перед тем как они попадут на Землю, пересекут (за счет магнитного дрейфа) область с повышенной напряженностью магнитного поля. Таким образом, если, например,

Земля попадет в область южной границы магнитной структуры с повышенной напряженностью поля, а скорость дрейфа направлена с юга на север, то эффекта в КЛ высоких энергий наблюдаться не будет.

Как следует из анализа поведения параметра β , в конце октября – начале ноября наблюдалась генерация магнитных полей в гелиосфере ($\beta > 1$), а 20 ноября – понижение напряженности ММП ($\beta < 1$).

На основе сравнения временных вариаций параметров жесткого спектра КЛ с временным профилем интенсивности КЛ низких энергий (см. рис. 1) обнаружено, что накануне солнечных протонных событий происходят изменения электромагнитных характеристик гелиосферы. В частности, обнаружено, что за несколько часов или десятков часов перед сол-

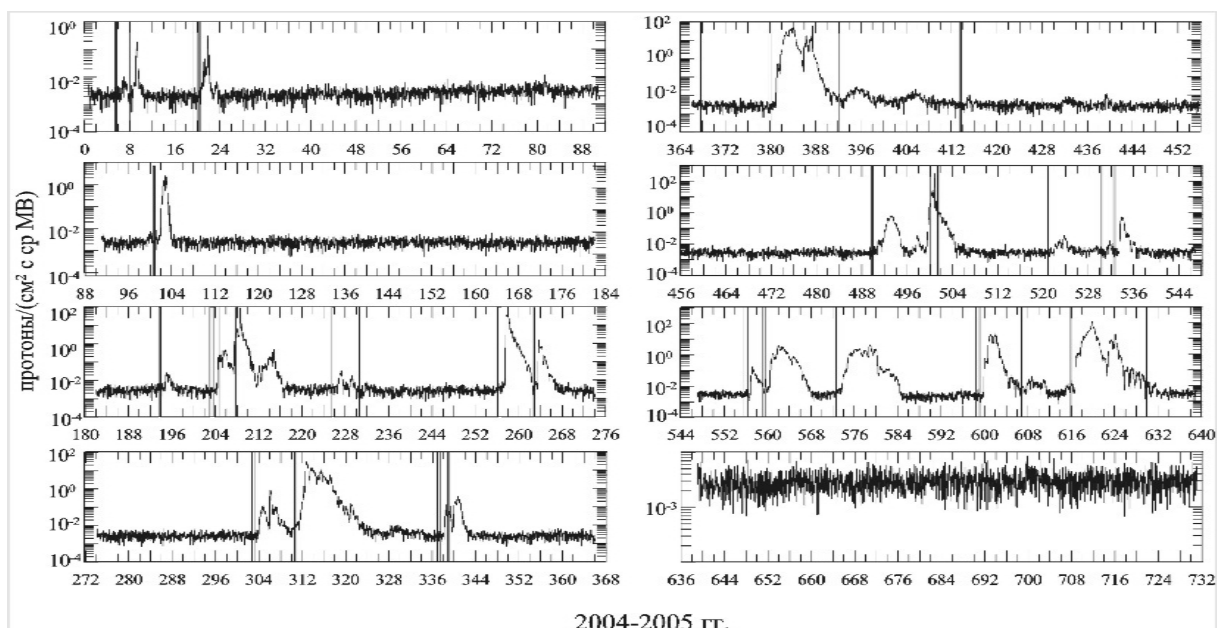


Рис. 2.

нечным протонным событием происходит генерация локальных поляризационных электрических полей (возрастание параметра α), понижение напряженности магнитных полей в мелкомасштабных структурах гелиосферы (уменьшение параметра β), а также возрастание напряженности крупномасштабного спиралевидного ММП (возрастание параметра $\Delta\epsilon_1$).

Совокупность этих трех признаков была использована для разработки метода прогноза солнечных протонных событий [7], позволяющего предсказывать эти события с заблаговременностью от нескольких часов до нескольких десятков часов со степенью оправданности около 90 %. Рисунок 2 иллюстрирует возможности данного метода. На рис. 2 представлены временные изменения интенсивности космических лучей с энергией 4–9 МэВ, зарегистрированные на спутниках за пределами магнитосферы Земли в течение 2004–2005 гг.

Вертикальными линиями указаны моменты появления предикторов солнечных протонных событий, которые вызывают наблюдаемые возрастания интенсивности высокоэнергичных частиц на Земле.

Заключение

Диагностика электромагнитных условий в межпланетном пространстве по эффектам в КЛ позволяет осуществлять прогноз солнечных протонных событий с заблаговременностью от нескольких часов до нескольких десятков часов с высокой степенью оправданности, что указывает на адекватность используемой модели модуляции и на достоверность получаемой информации о динамических процессах в гелиосфере.

Данная работа частично поддержана грантом по комплексному интеграционному проекту СО РАН-2006 № 3.10 и программе Президиума РАН «Нейтронная физика» в рамках проекта «Исследование модуляционных эффектов космических лучей методом наземного и стратосферного мониторинга».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топтыгин И.Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука, 1983. 301 с.
2. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy of cosmic rays at the period of Forbush effect on 12–15 July 1982 // International Journal of Geomagnetism and Aeronomy. 2002. V. 3, N 3. P. 217–226.
3. Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Cane H.V. Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~1 MeV) energies and association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta // J. Geophys. Res. V. 105, N A6. 2000. P. 12579.
4. <http://spidr.ngdc.gov/spidr/index.html/>
5. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Time variations of the cosmic ray distribution function during a solar event of September 29, 1989 // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N A11. P. 24209.
6. Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Correlation between variations of cosmic ray spectrum and interplanetary medium parameters // Proceedings of IInd International Symposium SEE-2005, Nor-Amberd, Armenia, September 26–30, 2005. P. 176–179.
7. Дворников В.М., Кравцова М.В., Луковникова А.А., Сдобнов В.Е. О возможности прогноза солнечных протонных событий // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71, № 7. С. 976–978.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск