

УДК 523.745+539.1633

ВАРИАЦИИ ЖЕСТКОСТНОГО СПЕКТРА И АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПЕРИОД СОЛНЕЧНО-ПРОТОННОГО СОБЫТИЯ 20 ЯНВАРЯ 2005 г.

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

VARIATIONS OF THE RIGIDITY SPECTRUM AND COSMIC RAY ANISOTROPY DURING SOLAR PROTON EVENT ON 20 JANUARY 2005

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

По данным наземных наблюдений интенсивности космических лучей (КЛ) на мировой сети станций методом спектрографической глобальной съемки исследованы вариации жесткостного спектра и анизотропии КЛ в период солнечно-протонного события 20 января 2005 года (начало в 06:36 UT с координатами на Солнце N14 W61). Показано, что на начальной стадии вспышки КЛ (06:45–06:50 UT) наблюдалась большая анизотропия (до 100 %) с максимальным потоком частиц из направления $\sim 60^\circ$ к югу от плоскости эклиптики. При совместном анализе наземных и спутниковых измерений протонов в энергетическом диапазоне от единиц МэВ до десятков ГэВ определены параметры жесткостного спектра КЛ, отражающие электромагнитные характеристики полей гелиосферы за период исследуемого события. На основе проведенного анализа дано объяснение наблюдаемой анизотропии и вариации КЛ в широком диапазоне энергий.

According to ground-based measurements of the cosmic ray (CR) intensity on a worldwide network of stations the method of spectrographic global survey investigates variations of the rigidity spectrum and anisotropy CR during solar-proton event on January, 20th, 2005 (the beginning at 06:36 UT, with coordinates on Sun N14 W61). It is shown, that at an initial stage of CR flare (06:45–06:50 UT) highest degree of anisotropy (up to 100 %) with the maximal flux of particles from a direction of 60 degrees to the south from a ecliptic plane was observed. At the joint analysis of ground and satellite measurements of protons in a energy range from units MeV up to tens GeV parameters rigidity spectrum CR, reflecting electromagnetic characteristics of fields of a heliosphere for the period of investigated event are certain. On the basis of the analysis the explanation of observable anisotropy and variation CR in a wide energy range is given.

Введение

20 января 2005 г. на мировой сети нейтронных мониторов зарегистрировано значительное повышение интенсивности космических лучей (КЛ), которое было связано со вспышкой на Солнце балла X7.1, начавшейся в 06:36 UT, в области 10720 с координатами N12 W58. Следует отметить, что зарегистрированное наземное повышение интенсивности КЛ (GLE) произошло на фазе восстановления форбуш-понижения, которое началось после геомагнитной бури с внезапным началом 17 января 2005 г.

Данное событие является уникальным по целому ряду свойств. Во-первых, был зарегистрирован очень интенсивный поток высокоэнергичных протонов ($>700 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ для $\epsilon_p > 100$ МэВ). Во-вторых, спутник CORONAS-F зарегистрировал поток гамма-излучения вплоть до 100 МэВ, что довольно редко регистрируется во время солнечных событий. В-третьих, возрастание интенсивности КЛ было зарегистрировано на наземной сети нейтронных мониторов (GLE) и явилось одним из крупнейших возрастаний после события 23 февраля 1956 г.

Целью предлагаемой работы является изучение проявлений всего этого комплекса явлений в межпланетном пространстве по вариациям жесткостного спектра космических лучей (КЛ), параметры которого, в соответствии с моделью модуляции регулярными электромагнитными полями гелиосферы [1], отражают электромагнитные характеристики межпланетной среды.

Данные и метод

Для анализа использовались усредненные за пятиминутные временные интервалы данные наблюдений интенсивности протонов в энергетических диапазонах 4–9, 9–15, 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ, полу-

ченные на спутнике GOES-11 [2], и усредненные за часовые временные интервалы данные о вариациях интенсивности КЛ различных жесткостей, полученные методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [3] по наземным измерениям на мировой сети нейтронных мониторов (43 станции). Обработка данных мировой сети станций КЛ проводилась методом спектрографической глобальной съемки [3], в основе которого заложено предположение о том, что анизотропия в распределении КЛ по направлениям прихода обусловлена зависимостью их интенсивности от питч-угла в межпланетном магнитном поле (ММП) и градиентом плотности на ларморовском радиусе частиц. Для описания анизотропии КЛ использовались три сферических гармоники, а для аппроксимации жесткостных зависимостей ряды по обратным степеням жесткости ограничивались тремя членами для изотропной составляющей и двумя – для каждой из составляющих анизотропии.

Для описания жесткостного спектра КЛ в широком диапазоне энергий использовалось выражение, полученное в работе [1]. Параметры спектра $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$, α , β , и R_0 отражают следующие характеристики гелиосферы: параметр $\Delta\epsilon_1$ характеризует изменения энергии КЛ вследствие их движения против индуцированного электрического поля за счет градиентного и центробежного дрейфов частиц в спиралевидном межпланетном магнитном поле (ММП) и пропорционален напряженности ММП, а $\Delta\epsilon_2$ – в полях корональных выбросов массы (КВМ) и пропорционален напряженности поля в КВМ и скорости солнечного ветра (СВ) [4]. Параметр $\beta=B/B_0$, B_0 – напряженность фонового, B – переменного во времени ММП, отражает влияние на спектр КЛ (при магнитной жесткости

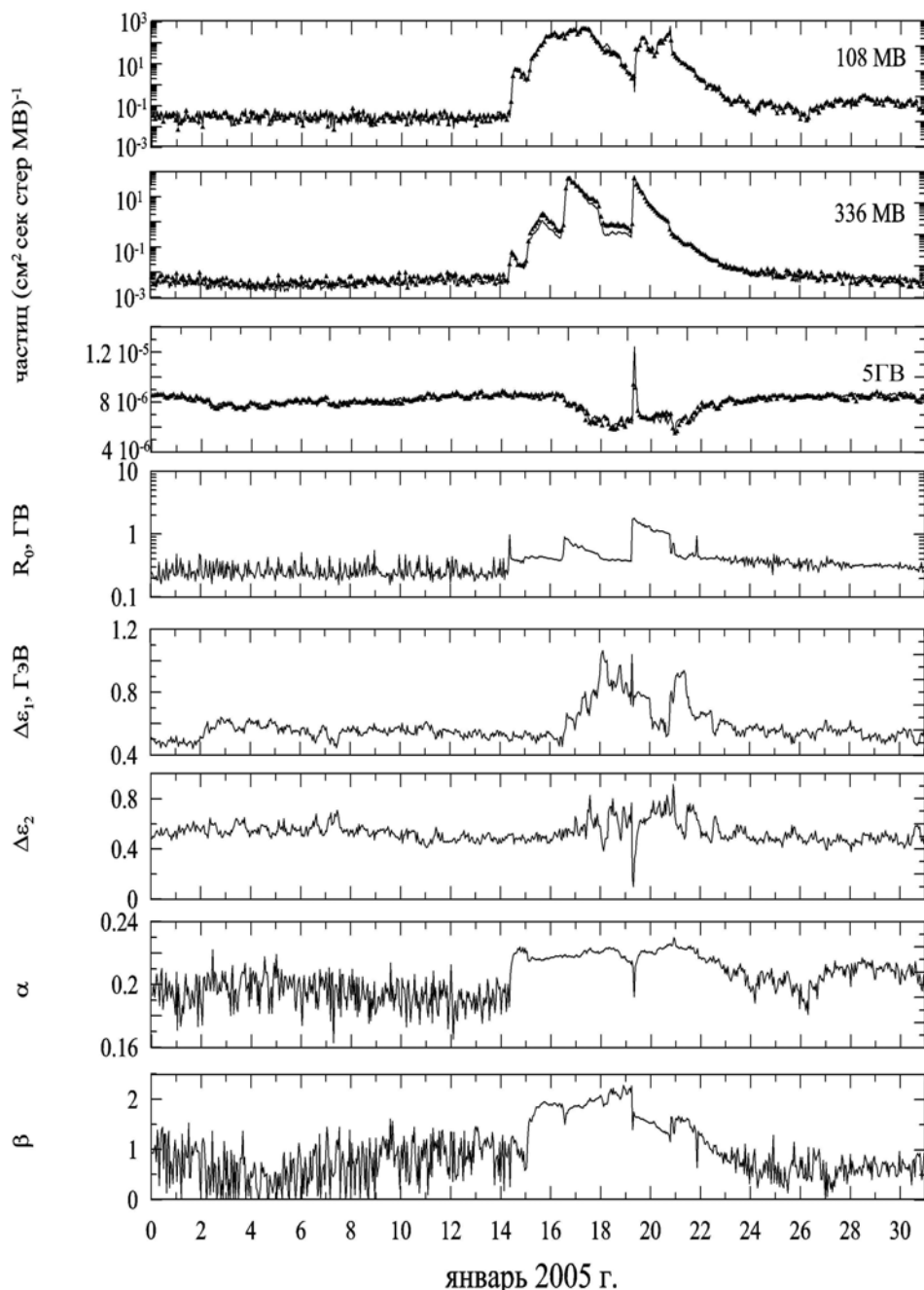


Рис. 1. На трех верхних панелях треугольниками представлены данные наблюдений протонных интенсивностей в энергетических интервалах 4–9 МэВ (0.108 ГВ), 15–40 МэВ (0.336 ГВ) и 5 ГВ, а кривыми – результаты расчетов с использованием модельного спектра и полученных значений его параметров. На пяти нижних панелях представлены среднечасовые значения параметров жесткого спектра R_0 , $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$, α , и β , определенные за исследуемый период.

частиц $R \leq R_0$) нестационарных во времени магнитных полей, а параметр $\alpha = E_{pl}^2/B^2$ – поляризационных электрических полей E_{pl} , возникающих при распространении ускоренных частиц в неоднородных полях гелиосферы [5 и ссылки там].

Таким образом, если определять параметры дифференциального жесткого спектра КЛ по данным его измерений в широком диапазоне энергий за каждый час наблюдений, возможен мониторинг электромагнитных характеристик гелиосферы и их динамики.

Результаты анализа

На рис. 1 на трех верхних панелях треугольниками представлены данные наблюдений протонных интенсивностей в энергетических интервалах 4–9

МэВ (0.108 ГВ), 15–40 МэВ (0.336 ГВ) и 5 ГВ, а кривыми – результаты расчетов с использованием модельного спектра и полученных значений его параметров. На пяти нижних панелях представлены среднечасовые значения параметров жесткого спектра R_0 , $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$, α , и β , определенные за исследуемый период.

На рис. 2 представлены дифференциальные жесткостные спектры КЛ в отдельные моменты времени исследуемого периода (кривые 2) совместно с фоновым спектром КЛ (кривые 1). Сплошные кривые 2 на графиках – результаты расчетов модельного спектра в указанные моменты времени, а треугольники – данные наблюдений. Расчетный фоновый спектр на графиках обозначен пунктирной кривой 1, а данные наблюдений – точками.

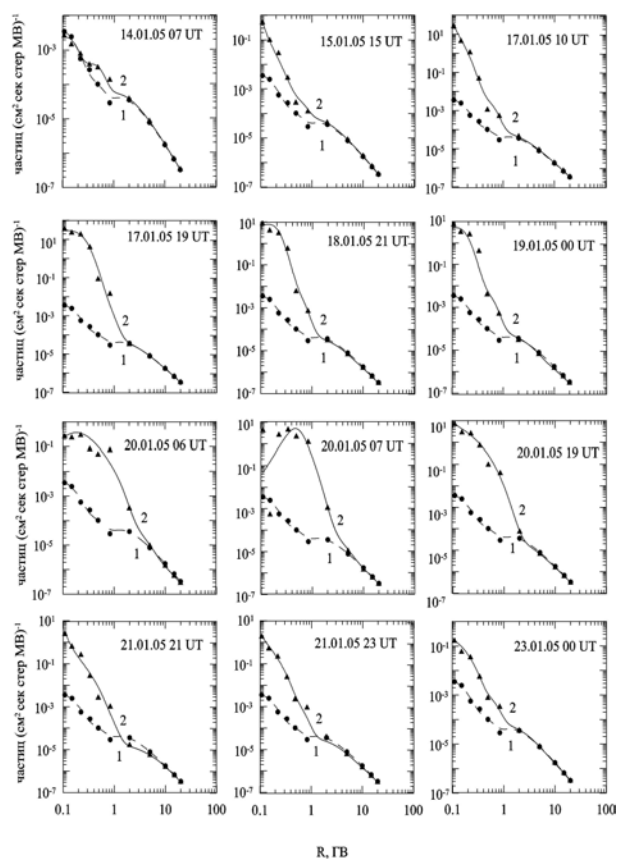


Рис. 2. Дифференциальные жесткостные спектры КЛ в отдельные моменты времени исследуемого периода (кривые 2) совместно с фоновым спектром КЛ (кривые 1). Сплошные кривые 2 на графиках – результаты расчетов модельного спектра в указанные моменты времени, а треугольники – данные наблюдений. Расчетный фоновый спектр на графиках обозначен пунктирной кривой 1, а данные наблюдений – точками.

На рис. 3 приведены относительные изменения интенсивности КЛ с $R = 4$ ГВ в зависимости от асимптотических направлений в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени 20 января 2005 г. Крестиками отмечены часовые значения направления ММП, измеренные на космических аппаратах.

Анализ распределения частиц с жесткостью $R = 4$ ГВ по направлениям прихода указывает на относительно стабильное поведение анизотропии КЛ в период ее максимальных значений. Так, на начальной фазе GLE в 06:55 UT увеличенный поток частиц приходил из направления $\sim 100^\circ$, $\sim -75^\circ$ (5100 %), в 07:00 – из направления $\sim 60^\circ$, $\sim -65^\circ$ (7500 %). В 7:05 UT и в 7.15 UT – из направления $\sim 15^\circ$, $\sim -60^\circ$ (2300 % и 850 % соответственно). В течение всего этого периода приход частиц происходил из направлений ортогональных вектору ММП. В дальнейшем увеличенный поток частиц приходил из направлений $\sim 120^\circ - 170^\circ$, $\sim 0^\circ \div -30^\circ$, совпадающих с направлением ММП.

Обсуждение результатов и выводы

Как следует из приведенных результатов, анизотропия КЛ в исследуемом событии не описывается простейшей зависимостью интенсивности от пичугла частиц в ММП. В моменты наблюдения максимальных значений анизотропии доминирующими

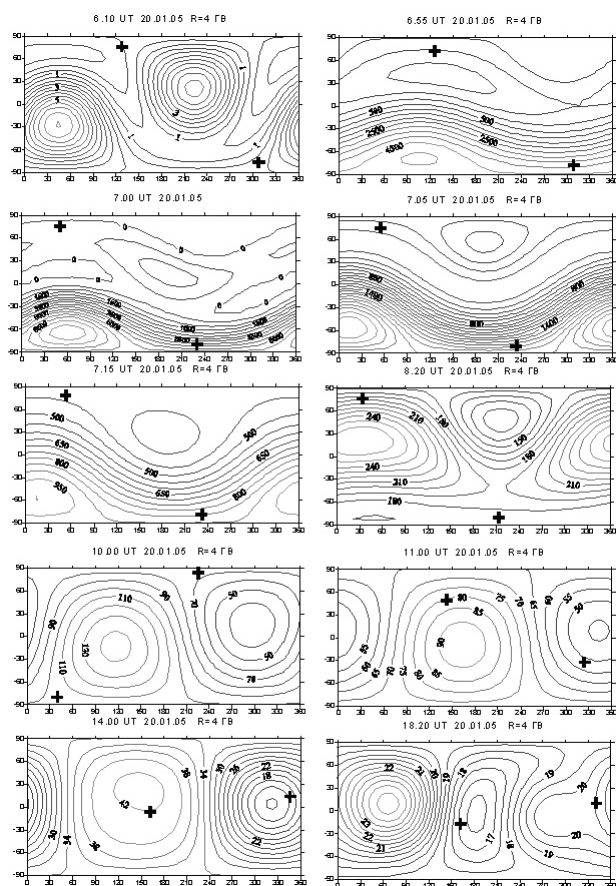


Рис. 3. Относительные изменения интенсивности КЛ с $R = 4$ ГВ в зависимости от асимптотических направлений в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени 20 января 2005 г. Крестиками отмечены часовые значения направления ММП, измеренные на космических аппаратах.

являются ее компоненты, ортогональные вектору ММП. Если предположить, что такое поведение анизотропии обусловлено градиентом плотности частиц на ларморовском радиусе, то при наблюдаемой ориентации ММП градиент плотности частиц должен быть направлен к Солнцу как на фазе возрастания интенсивности частиц, так и на фазе ее спада (см. третью панель рис. 1), из чего следует, что наблюдаемый временной профиль интенсивности КЛ обусловлен не прохождением мимо Земли сгустка частиц с энергией в несколько ГэВ, а временными вариациями их интенсивности вследствие ускорения фоновых КЛ поляризационными электрическими полями, возникающими при распространении СКЛ в неоднородных полях гелиосферы.

Анализируя поведение параметров жесткостного спектра КЛ в событии 20 января, можно видеть, что значения параметров α и β мало отличаются от их значений в периоды предшествующих СПС, т.е. поляризационные и вихревые электрические поля в гелиосфере являлись типичными, а возрастание интенсивности высокоэнергичных (~ 5 ГэВ) частиц обусловлено размером структур ММП, в которых происходило ускорение частиц под действием этих полей (возрастание параметра R_0 , см. третью и четвертую панели рис. 1).

Из анализа рис. 2 следует, что используемый вид спектра хорошо описывает наблюдаемую зависимость

интенсивности КЛ от их жесткости на всем анализируемом временном интервале, за исключением момента 07:00 UT 20 января, т.е. на начальной стадии GLE.

На основе проведенных исследований можно заключить, что в рассматриваемом диапазоне энергий вариации интенсивности энергичных частиц обусловлены изменением энергии галактических КЛ (ГКЛ) под действием электромагнитных полей, возникающих в гелиосфере вследствие распространения солнечных космических лучей, которые, в свою очередь, из-за обмена энергией с ГКЛ и частицами плазмы СВ перемещаются в область меньших энергий и регистрируются только в короткие моменты времени (например, в 07:00 UT 20.01.05, см. рис. 2), о чем можно судить по расхождениям между модельным и наблюдаемым спектрами в области малых энергий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике. Иркутск, 2005. С. 167–169.
2. <http://spidr.ngdc.gov/spidr/index.html>
3. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. // JGR. 1997. V. 102, N A11. P. 24209–24219.
4. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. // IJGA. 2002. V. 3, N 3. P. 217.
5. Альвен Х. Космическая плазма. М.: Мир, 1983. 213 с.

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