

**СПЕКТРЫ ВАРИАЦИЙ И АНИЗОТРОПИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
В ПЕРИОД GLE 11 ИЮНЯ 1991 г.****SPECTRA OF VARIATIONS AND COSMIC RAY ANISOTROPY DURING GLE
OF JUNE 11, 1991****М.В. Кравцова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, rina@iszf.irk.ru***В.Е. Сдобнов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sдобнов@iszf.irk.ru***M.V. Kravtsova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, rina@iszf.irk.ru***V.E. Sdobnov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, sдобнов@iszf.irk.ru*

Аннотация. По данным наземных и спутниковых наблюдений интенсивности космических лучей (КЛ) на мировой сети станций методом спектрографической глобальной съемки исследованы спектры вариаций и анизотропия КЛ в период наземного возрастания интенсивности КЛ (ground level enhancement, GLE) 11 июня 1991 г. Представлены спектры вариаций первичных КЛ в разные моменты времени данного события. Отмечено, что в этот период спектры вариаций КЛ не описываются ни степенной, ни экспоненциальной функциями жесткости частиц. Максимальная жесткость, до которой произошло ускорение протонов, 11 июня составила ~ 2.8 ГВ в 06:00 UT (спустя два часа после начала GLE). Приведены относительные изменения интенсивности КЛ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат в отдельные периоды исследуемого события. В распределении частиц с жесткостью 4 и 10 ГВ 11 июня доминирует двунаправленная анизотропия, что свидетельствует о прохождении Земли петлеобразной структуры ММП.

Ключевые слова: гелиосфера, космические лучи, солнечная активность.

Abstract. We have studied variation spectra and cosmic-ray (CR) anisotropy, using the ground-based and satellite observations of the CR intensity on the worldwide network of stations during the ground level enhancement (GLE) of June 11, 1991. The spectrographic global survey has been used. Variation spectra of primary CRs at different moments of the event are presented. Note that the CR variation spectra during this period are not described by a power or an exponential function of particle rigidity. The maximum rigidity, up to which the protons were accelerated on June 11, 1991, was ~ 2.8 GV (06:00 UT; i.e., two hours after GLE started). We show relative variations in the CR intensity in the geocentric solar ecliptic coordinate system during certain periods of the event under study. On June 11, 1991, the bidirectional anisotropy dominated in the distribution of particles with rigidity of 4 GV and 10 GV, which implies that the Earth passed the loop-like IMF structure.

Keywords: heliosphere, cosmic rays, solar activity.

ВВЕДЕНИЕ

Наземные возрастания интенсивности космических лучей (КЛ), так называемые события GLE (ground level enhancement), являются самыми большими и наиболее привлекательными для исследователей протонными возрастаниями. Из всех явлений солнечно-земной физики только GLE имеют порядковые номера (отсчет ведется с февраля 1942 г. по настоящее время). За весь период постоянных наземных наблюдений КЛ станциями мировой сети зарегистрировано 71 событие. GLE связаны с мощными проявлениями солнечной активности. Несмотря на то, что GLE составляют малую часть (<5 %) протонных событий, они привлекают внимание исследователей и практически каждому GLE посвящено множество публикаций (см., например, обзор [Miroshnichenko, 2001]).

В 1991 г. наблюдался максимум 22-го цикла солнечной активности. С 1 по 5 июня 1991 г. произо-

шло шесть интенсивных вспышек, из которых пять превышали класс X12.5.

На поверхности Земли 11 июня наблюдалось возрастание интенсивности КЛ (GLE51), вызванное мощной солнечной вспышкой класса X12/3B (координаты 31° N, 17° W) в активной области 6659. В линии H α начало вспышки соответствует $\sim 01:56$ UT [Solar-Geophysical Data, 1991]. По 5-минутным данным нейтронных мониторов на высокоширотной ст. «Апатиты» (жесткость геомагнитного обреза $R_c=0.6$ ГВ) и на среднеширотной ст. «Иркутск» ($R_c=3.66$ ГВ) максимальная амплитуда возрастания интенсивности КЛ наблюдалась в 03:45–03:50 UT и составила ~ 7.9 и 3.0 % соответственно [ftp://cr0.izmiran.rssi.ru].

Исследования энергетического спектра и анизотропии КЛ важны для понимания механизмов ускорения частиц в солнечных вспышках и распространения солнечных частиц в межпланетной среде.

1. ДАННЫЕ И МЕТОД

Для анализа использовались данные мировой сети станций нейтронных мониторов, исправленные за давление и усредненные за часовые интервалы. Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 3 марта 1991 г. Использовались данные 44 нейтронных мониторов и данные с космического аппарата GOES-7 [http://spidr.ngdc.gov/spidr/index.html] (протоны в семи энергетических интервалах 0.8–4, 4–9, 9–15, 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ).

Анализ выполнен методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [Dvornikov et al., 1983; Dvornikov, Sdobnov, 2002]. В отличие от существующих, метод СГС позволяет использовать для анализа весь имеющийся комплекс наземной регистрирующей аппаратуры (мировую сеть нейтронных мониторов, расположенных на разных уровнях в атмосфере Земли, а также наземные и подземные мезонные телескопы и т. д.).

Данное обстоятельство дает возможность наряду с фазами первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии определять жесткостной спектр изотропной составляющей и анизотропии. Зная фазу второй гармоники, можно получать информацию об ориентации межпланетного магнитного поля, а также определять вариации планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений или за меньшие временные интервалы в периоды возмущений геомагнитного поля.

Суть метода состоит в следующем. Если амплитуды вариаций интенсивности первичных КЛ $\Delta J/J$ невелики, то вариации интенсивности вторичных частиц $\Delta I/I$ связаны с $\Delta J/J$ соотношением

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_c^i}{I_c^i}(h_i) = & - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \Delta R_c(\alpha, \beta) W_c^i [R_c(\alpha, \beta), \alpha, \beta, h_i] \times \\ & \times \sin \beta d\beta d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_{R_c(\alpha, \beta)}^{\infty} \frac{\Delta J}{J}(R, \alpha, \beta) \times \\ & \times W(R, \alpha, \beta, h_i) \sin \beta d\beta d\alpha dR. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\frac{\Delta I_c^i}{I_c^i}(h_i)$ — амплитуда вариаций интегрального потока вторичных частиц типа i (относительно некоторого фонового уровня), наблюдаемых в географическом пункте с жесткостью R_c на уровне h_i в атмосфере Земли в момент времени t ; $\frac{\Delta J}{J}(R, \alpha, \beta)$ — вариации интенсивности частиц на границе атмосферы в данном пункте; α, β — азимутальный и зенитный углы прихода первичных частиц на границу атмосферы; R — магнитная жесткость частиц; $R_c(\alpha, \beta)$ — жесткость геомагнитного обрезания в направлениях (α, β) , а $\Delta R_c(\alpha, \beta)$ — ее возможные изменения; $W_c(R, \alpha, \beta, h_i)$ — функция, характеризующая связь между $\frac{\Delta I}{I}(h_i)$ и $\frac{\Delta J}{J}(R, \alpha, \beta)$ и удовлетворяющая условию нормировки

$$\int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{\pi/2} \sin \beta d\beta \int_{R_c(\alpha, \beta)}^{\infty} W_c^i(R, \alpha, \beta, h_i) dR = 1.$$

Поскольку целью является исследование вариаций $\Delta J/J$ в зависимости от питч-угла частиц в

ММП, во втором слагаемом правой части уравнения (1) следует произвести соответствующую замену угловых переменных. Для этого от переменных α, β перейдем к асимптотическим угловым переменным $\Psi(R, \alpha, \beta), \lambda(R, \alpha, \beta)$, определяющим направление движения частиц за пределами магнитосферы в некоторой выбранной системе координат.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_c^i}{I_c^i}(h_i) = & - \int \int_{\alpha \beta} \Delta R_c(\alpha, \beta) W_c^i [R_c(\alpha, \beta), \alpha, \beta, h_i] \times \\ & \times \sin \beta d\beta d\alpha + \\ & + \int \int \int_{\Psi \lambda R} \frac{\Delta J}{J} [R, \alpha(R, \Psi, \lambda), \beta(R, \Psi, \lambda)] \times \\ & \times W_c^i [R, \alpha(R, \Psi, \lambda), \beta(R, \Psi, \lambda), h_i] \times \\ & \times D \cos \lambda d\lambda d\Psi dR, \end{aligned} \quad (2)$$

где Ψ — азимутальный угол, $(\pi/2 - \lambda)$ — зенитный

угол, $D = \left\| \begin{array}{cc} \frac{\partial \alpha}{\partial \Psi} & \frac{\partial \alpha}{\partial (\cos \lambda)} \\ \frac{\partial (\cos \beta)}{\partial \Psi} & \frac{\partial (\cos \beta)}{\partial (\cos \lambda)} \end{array} \right\|$ — якобиан преобразования.

Условие нормировки имеет вид

$$\int \int \int_{\Psi \lambda R} W_c^i [R, \alpha(R, \Psi, \lambda), \beta(R, \Psi, \lambda), h_i] \times \times D \cos \lambda d\lambda d\Psi dR = 1.$$

Если в выбранной системе координат направление движения частицы определяется углами Ψ, λ , а направление ММП — углами Ψ_0, λ_0, n_j питч-угол частицы θ может быть выражен через эти характеристики:

$$\cos \theta = \mu = \sin \lambda \sin \lambda_0 + \cos \lambda \cos \lambda_0 \cos(\Psi - \Psi_0). \quad (3)$$

Представим функцию $\frac{\Delta J}{J}(R, \Psi, \lambda)$ в виде ряда

$$\frac{\Delta J}{J}(R, \Psi, \lambda) = \sum_{n=0}^m a_n(R) P_n(\mu), \quad (4)$$

где $P_n(\mu)$ — полиномы Лежандра, которые по теореме сложения для сферических функций могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} P_n(\mu) = & P_n(\sin \lambda) P_n(\sin \lambda_0) + \\ & + 2 \sum_{m=1}^n \frac{(n-m)!}{(n+m)!} P_n^m(\sin \lambda_0) \cos(\Psi - \Psi_0), \end{aligned} \quad (5)$$

где $P_n^m(\sin \lambda_0)$ — присоединенные полиномы Лежандра.

Из (5) следует, что если в системе координат, одна из осей которой направлена вдоль магнитного поля, а две другие — по нормали и бинормали к нему, функция распределения КЛ описывается выражением (4), то в системе координат, где направление поля не совпадает ни с одной из координатных осей, функция распределения может быть представлена рядом сферических гармоник. При этом амплитуды и фазы тессеральных (степени n и порядка m), секторальных ($m=n$) и зональных ($m=0$) сферических гармоник свя-

заны между собой через параметры питч-угловой анизотропии a_n , Ψ_0 , λ_0 соотношениями

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}a_n^0 &= a_n P_n(\sin \lambda_0), \\ a_n^m &= a_n \frac{2(n-m)!}{(n+m)!} P_n^m(\sin \lambda_0) \cos m\Psi_0, \\ -b_n^m &= a_n^m \frac{2(n-m)!}{(n+m)!} P_n^m(\sin \lambda_0) \sin m\Psi_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Для решения задачи в общем виде в (4) необходимо выбрать вид жесткостных зависимостей $a(R)$. При данной реализации метода функции $a(R)$ аппроксимировались рядом

$$a_n(R) = \sum_{k=1}^{m_n} a_{nk} R^{-k}. \quad (7)$$

Учитывая (5), подставим (4) в (2) и перейдем к угловым переменным α , β . Якобиан этого преобразования является обратным D . В результате получим

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_c^i}{I_c^i}(h_l) &= - \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \Delta R_c(\alpha, \beta) W_c^i[R_c(\alpha, \beta), \alpha, \beta, h_l] \times \\ &\times \sin \beta d\beta d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{R_c(\alpha, \beta)}^{\infty} \sum_{n=0}^m \left(\sum_{k=1}^{m_n} a_{nk} R^{-k} \right) \times \\ &\times \left\{ P_n[\sin \lambda(R, \alpha, \beta)] P_n(\sin \lambda_0) + 2 \sum_{m=1}^n \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \right. \\ &\times P_n^m[\sin \lambda(R, \alpha, \beta)] P_n^m(\sin \lambda_0) \times \\ &\times \cos m[\Psi(R, \alpha, \beta) - \Psi_0] \left. \right\} \times \\ &\times W_c^i(R, \alpha, \beta, h_l) \sin \beta d\beta d\alpha dR. \end{aligned} \quad (8)$$

Если КЛ регистрируются детекторами с узкой диаграммой направленности, ориентированной в зенит ($\beta=0$), магнитосферное слагаемое можно упростить:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \Delta R_c(\alpha, \beta) W_c^i[R_c(\alpha, \beta), \alpha, \beta, h_l] \sin \beta d\beta d\alpha &\approx \\ &\approx \overline{\Delta R_c} W_c^{i*}(\overline{R_c} h_l), \end{aligned}$$

где $\overline{\Delta R_c}$ — значение функции $\Delta R_c(\alpha', \beta')$ в некотором направлении, $\alpha', \beta', C_c^{i*}(R_c, h_l)$ — усредненная по телесному углу функция $W_c^{i*}[R_c(\alpha, \beta), \alpha, \beta, h_l]$.

Количество членов ряда (4) и (7) должно выбираться из соображений требуемой точности описания распределения частиц по питч-углам и энергиям. На практике этот выбор определяется количеством детекторов на мировой сети станций. Поэтому в (4) принято $m=2$, а в (7) $m_0=3$, $m_1=m_2=2$.

С учетом сделанных упрощений и ограничений (8) можно переписать следующим образом:

$$\frac{\Delta I_c^i}{I_c^i}(h_l) = -\overline{\Delta R_c} W_c^{i*}(R_c, h_l) + \sum_{j=0}^{10} \sum_{k=1}^{m_j} A_{jk} B_{jk}^{il}. \quad (9)$$

Здесь

$$\begin{aligned} A_{0k} &= a_{0k}; \\ B_{0kc}^{il} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{R_c(\alpha, \beta)}^{\infty} R^{-k} W_c^i(R, \alpha, h_l) \times \\ &\times \sin \beta d\beta d\alpha dR \equiv \hat{K} R^{-k}; \\ A_{1k} &= a_{1k} \cos \Psi_0 \cos \lambda_0; \\ B_{1kc}^{il} &= \hat{K} R^{-k} \cos[\Psi(R, \alpha, \beta)] \cos[\lambda(R, \alpha, \beta)]; \\ A_{2k} &= a_{1k} \sin \Psi_0 \cos \lambda_0; \\ B_{2kc}^{il} &= \hat{K} R^{-k} \sin[\Psi(R, \alpha, \beta)] \cos[\lambda(R, \alpha, \beta)]; \\ A_{3k} &= a_{1k} \sin \lambda_0; B_{3kc}^{il} = \hat{K} R^{-k} \sin[\lambda(R, \alpha, \beta)]; \\ A_{4k} &= a_{2k} \cos^2 \Psi_0 \cos^2 \lambda_0; \\ B_{4kc}^{il} &= \frac{3}{2} \hat{K} R^{-k} \cos^2[\Psi(R, \alpha, \beta)] \cos^2[\lambda(R, \alpha, \beta)]; \\ A_{5k} &= a_{2k} \cos \Psi_0 \sin \Psi_0 \cos^2 \lambda_0; \\ B_{5kc}^{il} &= 3 \hat{K} R^{-k} \cos[\Psi(R, \alpha, \beta)] \times \\ &\times \sin[\Psi(R, \alpha, \beta)] \cos^2[\lambda(R, \alpha, \beta)]; \\ A_{6k} &= a_{2k} \sin^2 \Psi_0 \cos^2 \lambda_0; \\ B_{6kc}^{il} &= \frac{3}{2} \hat{K} R^{-k} \sin^2[\Psi(R, \alpha, \beta)] \cos^2[\lambda(R, \alpha, \beta)]; \\ A_{7k} &= a_{2k} \cos \Psi_0 \cos \lambda_0 \sin \lambda_0; \\ B_{7kc}^{il} &= 3 \hat{K} R^{-k} \cos[\Psi(R, \alpha, \beta)] \times \\ &\times \cos[\lambda(R, \alpha, \beta)] \sin[\lambda(R, \alpha, \beta)]; \\ A_{8k} &= a_{2k} \sin \Psi_0 \cos \lambda_0 \sin \lambda_0; \\ B_{8kc}^{il} &= 3 \hat{K} R^{-k} \sin[\Psi(R, \alpha, \beta)] \times \\ &\times \cos[\lambda(R, \alpha, \beta)] \sin[\lambda(R, \alpha, \beta)]; \\ A_{9k} &= a_{2k} \sin^2 \lambda_0; B_{9kc}^{il} = \frac{3}{2} \hat{K} R^{-k} \sin^2[\lambda(R, \alpha, \beta)]; \\ A_{10k} &= a_{2k}; B_{10kc}^{il} = -\frac{1}{2} B_{0kc}^{il}. \end{aligned}$$

При вычислении коэффициентов B_{jk}^{il} используются асимптотические углы, полученные в результате траекторных расчетов [Shea et al., 1965; McCracken et al., 1965], и формулы из работы [Дорман, 1975]. Расчеты проведены для игольчатой диаграммы направленности детекторов.

Задача сводится к отысканию следующих неизвестных параметров: $\overline{\Delta R_c}$, характеризующих изменение жесткостей геомагнитного обрезания в пунктах наблюдений, где проявляются эти изменения; $a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$, характеризующих амплитуды и жесткостные зависимости нулевой, первой и второй гармоник питч-углового распределения КЛ; Ψ_0 и λ_0 , определяющих осредненное в пределах ларморовской окружности направление ММП (с точностью до π).

Для решения сформулированной задачи необходимо, чтобы сеть станций и комплексы детекторов на этих станциях обеспечивали избыточность системы уравнений (9) и линейную независимость

коэффициентов B_{jkc}^{il} . В пунктах, где определяются изменения жесткостей геомагнитного обрезания, должно быть не менее двух детекторов с различающимися $W_c^{is}(\overline{R}_c, h_t)$.

В этом случае при применении метода СГС не используются данные многих средне- и низкоширотных станций мировой сети, на которых имеется только по одному прибору, измеряющему интенсивности КЛ.

Поэтому метод СГС модифицирован [Дворников, Сдобнов, 1991] за счет аппроксимации зависимости ΔR от R_c в некотором долготном интервале функцией, достаточно хорошо описывающей особенности этой зависимости и имеющей небольшое количество линейных параметров. В качестве аппроксимации используется функция, с помощью которой даже при $n=2$ удается описать зависимость ΔR_r от R_c с относительной погрешностью $\sim 5\%$.

Функция имеет вид

$$\Delta R_r = \left(\sum_{i=1}^n k_{ir} R_c^i \right) \exp(-\sqrt{R_c}),$$

где r — номер долготного интервала.

В этом случае мировая сеть станций может быть разделена на три региона: Американский (60° W, 180° W), $r=1$; Европейский (60° W, 60° E); $r=2$ и Азиатский (60° E, 180° E), $r=3$.

В результате такой модификации метода СГС удается учесть зависимость магнитосферных эффектов как от местного времени (за счет разбиения мировой сети на регионы), так и от пороговых жесткостей геомагнитного обрезания, т. е. используются станции как можно в более широком диапазоне пороговых жесткостей геомагнитного обрезания, расположенные на различных уровнях в атмосфере Земли, что позволяет более эффективно использовать мировую сеть станций КЛ. Кроме того, имеется возможность определения симметричной составляющей ΔR за каждый час наблюдений.

Достоверность получаемых параметров проверяется путем сравнения с соответствующими характеристиками межпланетной среды и магнитосферы Земли.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1 приведены вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 и 10 ГВ; амплитуды первой A_1 и второй A_2 гармоник углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ.

Из рис. 1, а, б следует, что интенсивность первичных частиц с жесткостью 4 ГВ в 04:00 UT повысилась на $\sim 8\%$ по сравнению с интенсивностью в 03:00 UT. В то же время интенсивность первичных частиц с жесткостью 10 ГВ в 04:00 UT меньше, чем частиц с жесткостью 4 ГВ, при этом она повысилась на $\sim 5\%$.

Как следует из поведения амплитуд первой A_1 и второй A_2 гармоник питч-угловой анизотропии КЛ (см. рис. 1, в, з), в момент регистрации GLE ($\sim 04:00$ UT 11 июня) наблюдалось повышение амплитуды второй сферической гармоники питч-углового распределения

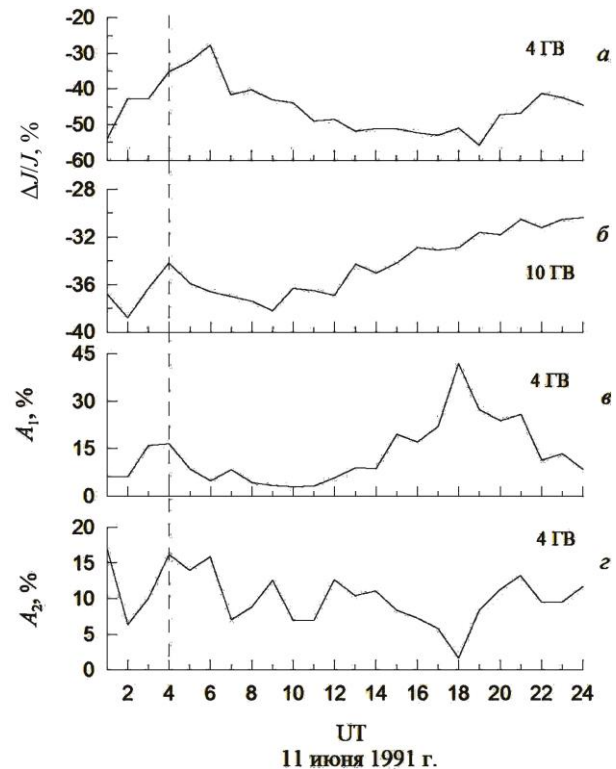


Рис. 1. GLE 11 июня 1991 г.: вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 ГВ и 10 ГВ (а, б); амплитуды первой сферической гармоники A_1 для частиц с жесткостью 4 ГВ (в); амплитуды второй сферической гармоники A_2 для частиц с жесткостью 4 ГВ (з)

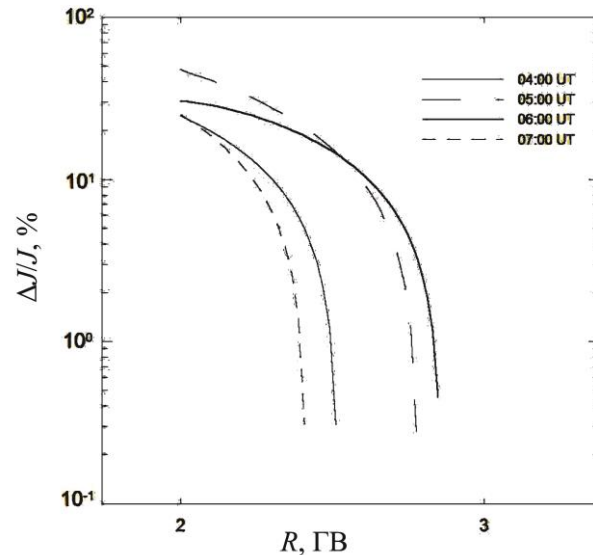


Рис. 2. Спектры вариаций первичных КЛ

КЛ с жесткостью 4 ГВ до величины $\sim 16\%$, а амплитуда первой сферической гармоники A_1 для частиц той же жесткости составляла $\sim 17\%$. Появление второй гармоники в распределении частиц свидетельствует о магнитных облаках с петлеобразной структурой ММП [Дворников и др., 2013].

На рис. 2 представлены спектры вариаций первичных КЛ в разные моменты времени в период GLE в двойном логарифмическом масштабе. Видно, что спектры вариаций КЛ во время этого события не описываются ни степенной, ни экспоненциальной функ-

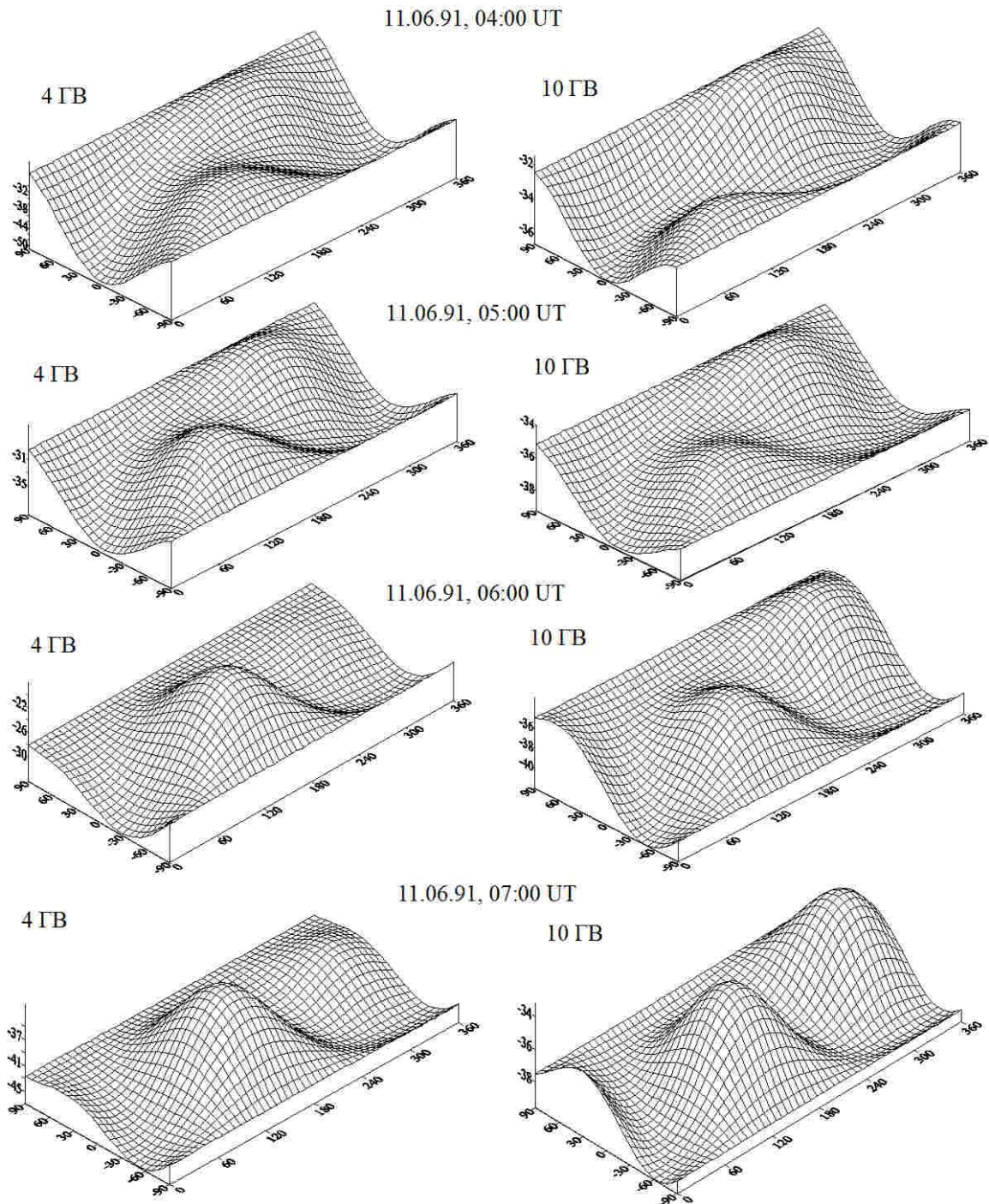


Рис. 3. Относительные изменения интенсивности КЛ 11 июня 1991 г. с жесткостями 4, 10 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени в период GLE

циями жесткости частиц. Максимальная жесткость ускоренных частиц составила ~ 2.8 ГВ в 06:00 UT, спустя два часа после начала GLE, в момент которого частицы были ускорены \sim до 2.5 ГВ. Факт появления малоэнергичных частиц на орбите Земли раньше, чем более энергичных, был обнаружен нами в событии GLE 15 июня 1991 г. [Кравцова, Сдобнов, 2011].

На рис. 3 приведены относительные изменения интенсивности КЛ с жесткостями 4 и 10 ГВ в зависимости от асимптотических направлений в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат в трехмерном изображении в отдельные моменты

времени GLE 11 июня. По оси абсцисс отложены значения долготного угла, по оси ординат — широтного. Видно, что в представленные моменты времени для частиц с жесткостью 4 и 10 ГВ интенсивность частиц в области гелиоэкватора ниже, чем в северной и южной полусферах, при этом наблюдается двунаправленная анизотропия. Так, повышенный поток частиц с жесткостью 4 ГВ в 04:00 и 05:00 UT идет практически из одних направлений: $\psi \sim 110^\circ$, $\lambda \sim -50^\circ$ и $\psi \sim 225^\circ$, $\lambda \sim 75^\circ$. В 06:00–07:00 UT центры смещаются и повышенная интенсивность частиц наблюдается из направлений $\psi \sim 140^\circ$, $\lambda \sim -25^\circ$ и $\psi \sim 310^\circ$, $\lambda \sim 50^\circ$.

Для частиц с жесткостью 10 ГВ вариации углового распределения идентичны вариациям интенсивности частиц с жесткостью 4 ГВ.

ВЫВОДЫ

В распределении частиц с жесткостями 4 и 10 ГВ 11 июня 1991 г. доминирует двунаправленная анизотропия. Большое значение второй гармоники в рассматриваемый период свидетельствует о том, что в это время Земля находилась внутри коронального выброса массы с петлеобразной структурой ММП.

Обнаружено возрастание потоков частиц с меньшей жесткостью раньше, чем частиц с большей. Максимальная жесткость, до которой произошло ускорение протонов, составила ~2.8 ГВ в 06:00 UT 11 июня, спустя два часа после начала GLE.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-12-00760) «Исследования природы солнечных космических лучей и штормовых частиц».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Диагностика электромагнитных характеристик межпланетной среды по эффектам в космических лучах // Геомагнетизм и аэронаука. 2013. Т. 53, № 4. С. 457–468.

Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Модификация метода спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55, № 10. С. 1988–1991.

Дорман Л.И. Вариации галактических космических лучей. М.: Изд-во МГУ, 1975. 214 с.

Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Солнечное протонное событие 15 июня 1991 г. // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике: Труды XII конференции молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования». Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2011. С. 77–80.

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V. Analysis of cosmic ray pitch-angle anisotropy during the Forbush-effect in June 1972 by the method of spectrographic global survey // Proc. 18th ICRC. 1983. Bangalore. India. V. 3. P. 249–252.

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy cosmic rays at the period of Forbush effect on the 12–25 July 1982 // IJGA. 2002. V. 3, N 3. P. 217–228.

McCracken K.G., Rao U.R., Fowler B.S., et al. Cosmic Ray Tables (Asymptotic Directions, Variational Coefficients and Cut-off Rigidities) / IQSY Instruction Manual. 1965. N. 10. P. 104.

Miroshnichenko L.I. Solar Cosmic Rays. Springer. 2001. 480 p.

Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G. A study of vertically incident cosmic-ray trajectories using sixth-degree simulations of the geomagnetic fields // Environmental Research Paper. 1965. N 141. P. 382.

Solar-Geophysical Data. 1991. N 563, Pt 1. P. 36.

URL: <ftp://cr0.izmiran.rssi.ru>.

URL: <http://spidr.ngdc.gov/spidr/index.html>.

REFERENCES

Dorman L.I. *Variatsii galakticheskikh kosmicheskikh luchei* [Variations of Galactic Cosmic Rays]. Moscow, MSU Publ., 1975. 214 p. (in Russian).

Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Diagnostics of electromagnetic characteristics of the interplanetary medium by cosmic ray effects. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2013, vol. 53, no. 4, pp. 430–440 (in Russian).

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Modification of the method of spectrographic global survey for studying variations of planetary system of geomagnetic cutoff rigidities. *Izvestiya AN SSSR. Ser fiz.* [Bulletin of USSR Academy of Sciences. Physics] 1991, vol. 55, no. 10, pp. 1988–1991 (in Russian).

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V. Analysis of cosmic ray pitch-angle anisotropy during the Forbush-effect in June 1972 by the method of spectrographic global survey. Proc. 18th ICRC. Bangalore. India. 1983, vol. 3, pp. 249–252.

Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy cosmic rays at the period of Forbush effect on the 12–25 July 1982. *IJGA*. 2002, vol. 3, no. 3, pp. 217–228.

Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Solar proton event of June 15, 1991. *Mezhdunarodnaya Baikalskaya Molodezhnaya Nauchnaya Shkola po Fundamental'noi Fizike: Trudy XII konferentsii molodykh uchenykh "Gelio- i geofizicheskie issledovaniya"* [Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics: Proc. XII Young Scientists' Conference "Helio- and Geophysical Research"]. Irkutsk, ISTP SB RAS, 2011. pp. 77–80 (in Russian).

McCracken K.G., Rao U.R., Fowler B.S., et al. Cosmic Ray Tables (Asymptotic Directions, Variational Coefficients and Cut-off Rigidities) / IQSY Instruction Manual. 1965, no. 10, p. 104.

Miroshnichenko L.I. *Solar Cosmic Rays*. Springer, 2001, 480 p.

Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G. A study of vertically incident cosmic-ray trajectories using sixth-degree simulations of the geomagnetic fields. *Environmental Research Paper*. 1965, no. 141, p. 382.

Solar-Geophysical Data. 1991, no. 563, Pt 1, p. 36.

Available at: <ftp://cr0.izmiran.rssi.ru>.

Available at: <http://spidr.ngdc.gov/spidr/index.html>.