

ЭФФЕКТЫ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ В МАРТЕ 1991 г.

М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов

EFFECTS IN COSMIC RAYS IN MARCH 1991

M.V. Kravtsova, V.E. Sdobnov

По данным наземных наблюдений космических лучей (КЛ) на мировой сети станций методом спектрографической глобальной съемки исследованы вариации жесткостного спектра и анизотропии галактических КЛ в марте 1991 г. Расчитаны изменения жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО), приведен широтный ход изменений ЖГО в отдельные моменты рассмотренного периода для различных уровней возмущенности геомагнитного поля. Сопоставлены результаты расчетов изменений ЖГО с результатами расчетов влияния тока, текущего в западном направлении по параллелям на сфере с силой, пропорциональной косинусу широты, для разных радиусов токового кольца в дипольном поле.

Полученные результаты могут быть использованы для тестирования различных моделей магнитосферных токовых систем и их динамики в периоды геомагнитных возмущений.

Using the method of spectrographic global survey, variations in rigidity spectrum and anisotropy of galactic cosmic rays (March 1991) have been studied using data from ground-based observations of cosmic rays (CR) at the worldwide network of stations. Variations in geomagnetic cutoff rigidity (GCR) have been calculated. The paper also presents latitudinal GCR variations at certain moments of the period under consideration, for different levels of the geomagnetic field disturbance. Calculation results of GCR variations have been compared with calculations of effect of the westward current flowing with the strength proportional to the latitude cosine along parallels on the sphere, for different radii of the current ring in the dipole field.

These results can be used to test different models of magnetospheric current systems and their dynamics during geomagnetic disturbances.

Введение

Вариации вторичных космических лучей (КЛ), наблюдаемые на поверхности Земли, являются интегральным результатом различных солнечных, гелиосферных и атмосферных явлений. Ярким примером влияния солнечной активности на КЛ являются форбуш-эффекты, которые представляют собой резкие понижения интенсивности КЛ, наблюдаемые на Земле.

Форбуш-понижения (ФП) и геомагнитные бури вызываются солнечными выбросами, которые при распространении от Солнца трансформируются в межпланетные облака (МО), взаимодействующие с магнитосферой Земли. Ранее было показано [Richardson et al., 2000; Dvornikov et al., 1983; 2002], что в периоды максимального понижения интенсивности КЛ наблюдается значительная анизотропия, изменчивость фаз которой свидетельствует о выносе МО и петлеобразных структур межпланетного магнитного поля (ММП) корональными выбросами вещества, а также о высокой степени регулярности ММП в этих структурах.

Интенсивность геомагнитных бурь зависит от величины и знака B_z -компоненты магнитного поля в МО, а глубина ФП не зависит от знака B_z и определяется напряженностью магнитного поля в облаке, а также его скоростью и размерами [Belov, 2009].

В период геомагнитных бурь изменяются жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО) и асимптотические направления прихода КЛ в пунктах наблюдения. Вариации КЛ, связанные с изменениями ЖГО во время магнитных бурь, исследовались в ряде работ [Тясто и др., 2004; Baisultanova et al., 1987; Дворников и др., 2005; 2006; 2009].

22 марта 1991 г. на Солнце в области 6555 (координаты 26° S 28° E) в 22:43 UT произошла мощная вспышка класса 3В, сопровождавшаяся выбросом большой массы солнечного вещества. События именно в этой активной области стали источником большой магнитной бури 24 марта ($K_p=7$, $D_{st} \sim 300$ нТл) и ФП в КЛ.

В это время наблюдались значительные амплитуды модуляции интенсивности нейтронной компоненты КЛ ($\sim 23\%$ на высокоширотных станциях и $\sim 13\%$ на низкоширотных станциях).

Данные и метод

Для анализа использовались данные мировой сети станций нейтронных мониторов, исправленные на давление и усредненные за часовые интервалы. Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 3 марта 1991 г. Использовались данные 44 нейтронных мониторов, из них 14 высокоширотных, 24 среднеширотных и 6 низкоширотных нейтронных мониторов.

Анализ выполнен с применением метода спектрографической глобальной съемки (СГС) [Dvornikov et al., 1983; 2002], позволяющего по данным наземных наблюдений исследовать вариации жесткостного спектра и анизотропии КЛ, а также изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений.

Распределение амплитуд вариаций вторичных КЛ по земному шару описывается следующей системой нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_c^i}{I_c^i}(h_l) = & -\Delta R_c W^i(R_c, h_l) \left(1 + \frac{\Delta J}{J}(R_c) \right) + \\ & + \frac{1}{R_c} \left\{ \sum_{k=1}^3 a_{ok} R^{-k} + \sum_{n=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left[(c_{nk} R^{-k}) P_n(\mu) \right] \times \right. \\ & \left. \times \sum_{k=1}^2 \left(d_{1k} R^{-k} \right) P_1(v) \right\} dR. \end{aligned}$$

Здесь $\frac{\Delta I_c^i}{I_c^i}(h_l)$ – амплитуды вариаций интегрального потока вторичных частиц типа i (относительно некоторого фонового уровня I_c^i), наблюдаемых в географическом пункте c на уровне h_l в атмосфере

Земли; $\frac{\Delta J}{J}(R)$ – амплитуды вариаций первичного спектра (в методе СГС используется формальная математическая аппроксимация $\frac{\Delta J}{J}(R)$ рядом по обратным степеням жесткости R); R_c – эффективная жесткость геомагнитного обрезания; $W(R_c, h)$ – функция связи между первичными и вторичными вариациями КЛ; $P_n(\mu)$, $P_n(\nu)$ – полиномы Лежандра; μ и ν – косинус питч-угла частицы; $\psi_c(R)$, $\lambda_c(R)$ – асимптотические углы прихода частиц в данный пункт.

Жесткостные спектры изотропной составляющей и анизотропии аппроксимированы рядами по обратным степеням жесткости частиц.

Зависимость ΔR_c от пороговой жесткости аппроксимирована выражением

$$\Delta R_c(R_c) = (b_1 R_c + b_2 R_c^2) e^{-\sqrt{R_c}}.$$

Из-за того, что станции КЛ распределены по земному шару неравномерно, долготный эффект изменений ЖГО КЛ в расчетах не учитывался.

Результаты анализа

На рис. 1 сверху вниз приведены временные профили: модуля ММП, вариаций изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 ГВ (тонкая линия) и 20 ГВ (толстая линия), интенсивности частиц с жесткостью 0.108 и 5 ГВ, амплитуд первой и второй сферических гармоник для частиц жесткостью 4 ГВ, D_{st} -индекса, изменений ЖГО (ΔR_c) в Иркутске ($R_c=3.66$ ГВ) и Уанкае ($R_c=13.01$ ГВ), толстая и тонкая линии соответственно, полученные методом СГС.

На рис. 2 представлены изменения ЖГО ΔR_c в зависимости от пороговых жесткостей R_c в отдельные моменты времени в марте 1991 г.

На рис. 3 изолиниями представлены относительные изменения интенсивности КЛ с $R=4$ ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени. По оси абсцисс отложены значения долготного угла ψ , а по оси ординат – широтного угла λ . Цифры на изолиниях указывают значения амплитуд вариаций интенсивности частиц в процентах к фоновому уровню. Символами «+» обозначена ориентация вектора ММП в рассматриваемые моменты времени.

Обсуждение результатов и выводы

Как следует из графиков рис. 1, максимальная амплитуда модуляции для частиц с $R=4$ и 20 ГВ наблюдалась 24 марта и составляла $\sim 50\%$ и $\sim 23\%$ соответственно. Если спектр вариаций КЛ представлять степенной функцией от жесткости ($\Delta J/J \sim R^{-\gamma}$), то показатель спектра вариаций (γ) в жесткостном диапазоне 10–100 ГВ в это время составил ~ 0.88 , что согласуется с результатом работы [Ahuwalia et al., 2009], где γ составил ~ 0.78 . В то же время при жесткостях ниже 10 ГВ спектр вариаций не описывается степенной функцией.

Амплитуды первой (A_1) и второй (A_2) гармоники анизотропии, наблюдаемые в период максимальной

модуляции 24 марта, составили $\sim 30\%$, $\sim 7\%$ соответственно для частиц с $R=4$ ГВ. Максимальные амплитуды первой сферической гармоники наблюдались 15 и 28 марта ($\sim 55\%$), 24–25 марта ($\sim 60\%$), а второй сферической гармоники – 24 марта ($\sim 50\%$).

Рассчитанный временной ход изменений ЖГО (ΔR_c) в Иркутске ($R_c=3.66$ ГВ) хорошо коррелирует с D_{st} -индексом. Так, за весь исследуемый период коэффициент корреляции составил ~ 0.72 , а в период максимального возмущения (24–25 марта) – ~ 0.83 . Коэффициент корреляции между ΔR_c в Уанкае ($R_c=13.01$ ГВ) и D_{st} -индексом низок и составляет ~ 0.29 .

На рис. 2 представлена зависимость изменений пороговых ЖГО (ΔR_c) от пороговых жесткостей R_c в отдельные моменты геомагнитного возмущения в марте 1991 г. Сплошными линиями показаны результаты расчетов методом СГС по данным мировой сети станций КЛ, а пунктирными линиями – результаты расчетов влияния на изменения ЖГО тока, текущего в западном направлении по параллелям на сфере с силой, пропорциональной косинусу широты, для разных радиусов токового кольца в дипольном поле [Дорман, 1971]. Из рис. 2 следует, что 24 марта в 20:00 UT радиус токового кольца составил $\sim 3 R_E$; 24 марта в 23:00 UT, 25 марта в 01:00 UT, 07:00–08:00 UT, 10:00 UT и 12:00 UT – $\sim 5 R_E$, а 25 марта в 09:00 UT и 13:00 UT радиус токового кольца изменялся до $\sim 3 R_E$. Максимальные значения понижений ЖГО в этот период наблюдались на среднеширотных станциях ($R_c \sim 3$ ГВ).

Первая гармоника доминировала 6, 12 и 22 марта, как следует из рис. 3; в эти моменты времени интенсивность КЛ была понижена на $\sim 25\%$ в направлении $\psi \sim 100^\circ$, $\lambda \sim 0^\circ$; $\sim 40\%$ – в направлении $\psi \sim 280^\circ$, $\lambda \sim 0^\circ$; $\sim 50\%$ – в направлении $\psi \sim 275^\circ$, $\lambda \sim 10^\circ$. Вторая гармоника доминировала 7 и 24 марта, поток интенсивности КЛ был повышен на 9 % с фазой $\psi \sim 100^\circ$, $\lambda \sim -45^\circ$ и $\psi \sim 260^\circ$, $\lambda \sim -65^\circ$; на $\sim 12\%$ с фазой $\psi \sim 35^\circ$, $\lambda \sim -15^\circ$ и $\psi \sim 220^\circ$, $\lambda \sim -5^\circ$, на 15 % – с фазой $\psi \sim 185^\circ$, $\lambda \sim 10^\circ$ и на 45 % – с фазой $\psi \sim 10^\circ$, $\lambda \sim 2^\circ$ соответственно. Первая гармоника доминировала 25 марта в 04:00 и 21:00 UT во время магнитной бури ($D_{st} \sim -300$ нТл), наблюдалось понижение интенсивности КЛ на 38 % из направления $\psi \sim 340^\circ$, $\lambda \sim -15^\circ$ и на 71 % – из направления $\psi \sim 270^\circ$, $\lambda \sim 0^\circ$ соответственно.

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Наблюдаемая большая анизотропия в питч-угловом распределении КЛ говорит о высокой степени регулярности ММП в корональном выбросе массы, пришедшем на орбиту Земли.

2. Между временными профилями изменения ЖГО в среднеширотных и низкоширотных областях имеются существенные различия.

3. Нет однозначной связи между временными профилями изменений ЖГО на низкоширотных станциях КЛ и D_{st} -индексом. В то же время существует хорошее соответствие между этими величинами для среднеширотных пунктов наблюдения КЛ.

4. По поведению зависимости изменений пороговых ЖГО (ΔR_c) от пороговых жесткостей R_c можно судить о радиусе токового кольца в дипольном поле.

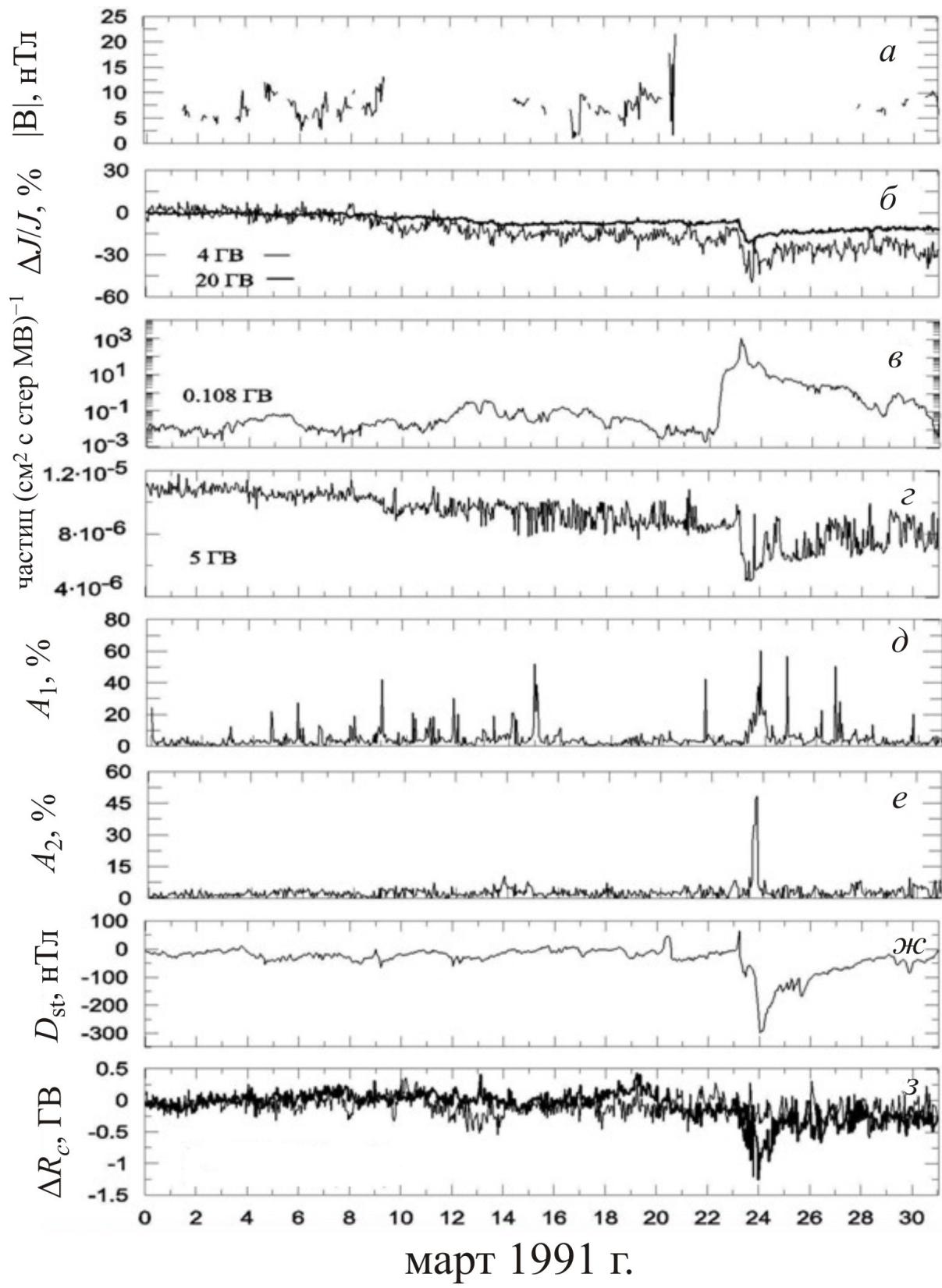


Рис. 1. Временные профили: *а* – модуля ММП; *б* – вариаций изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 4 ГВ (тонкая линия) и 20 ГВ (толстая линия); *в* – интенсивности частиц с жесткостью 0.108 ГВ; *г* – интенсивности частиц с жесткостью 5 ГВ; *д* – амплитуды первой сферической гармоники для частиц с жесткостью 4 ГВ; *е* – амплитуды второй сферической гармоники для частиц с жесткостью 4 ГВ; *ж* – D_{st} -индекса; *з* – амплитуды изменений ЖГО (ΔR_c) в Иркутске ($R_c=3.66$ ГВ) и Янкае ($R_c=13.01$ ГВ), толстая и тонкая линии соответственно, полученные методом СГС.

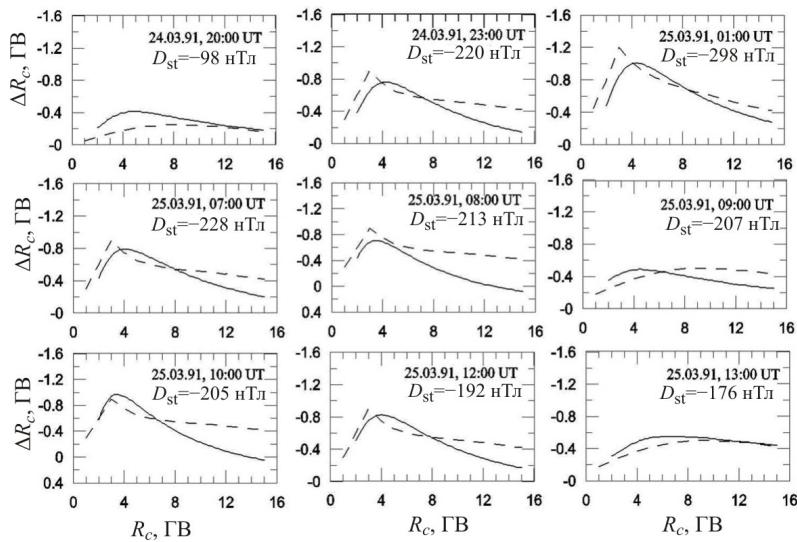


Рис. 2. Результаты расчетов зависимости изменений ЖГО ΔR_c от пороговых жесткостей R_c в отдельные моменты геомагнитного возмущения в марте 1991 г. методом СГС по данным мировой сети станций КЛ (сплошная линия) совместно с результатами расчетов влияния на изменения ЖГО тока, текущего в западном направлении по параллелям на сфере с силой, пропорциональной косинусу широты, для разных радиусов токового кольца в дипольном поле [Дорман, 1971] (штриховая).

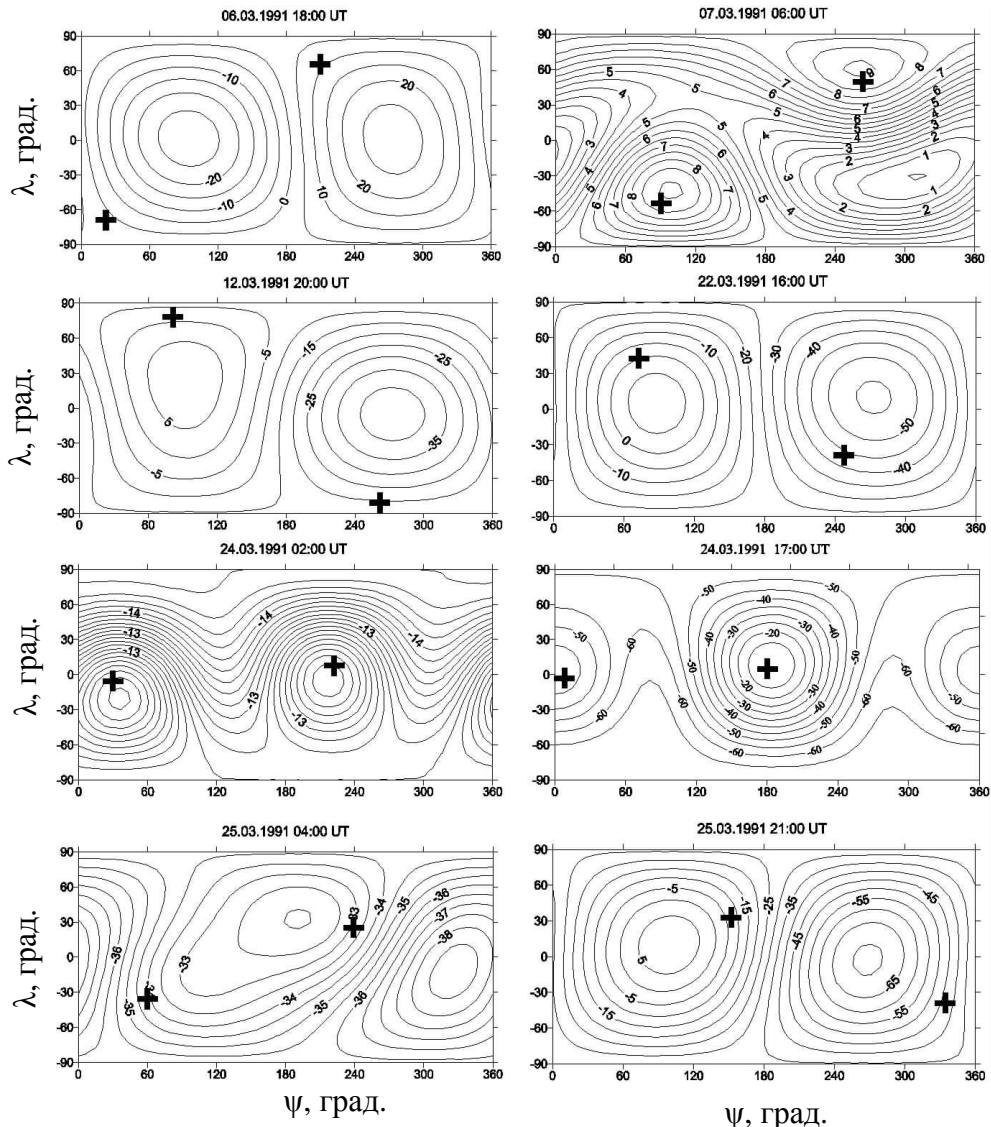


Рис. 3. Изолиниями представлены относительные изменения интенсивности КЛ с $R=4$ ГВ в солнечно-эклптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени. По оси абсцисс отложены значения долготного угла ψ , а по оси ординат – широтного угла λ . Цифры на изолиниях указывают значения амплитуд вариаций интенсивности частиц в процентах к фоновому уровню. Символами «+» обозначена ориентация вектора ММП в рассматриваемые моменты времени.

5. Полученные результаты могут быть использованы для тестирования различных моделей магнитосферных токовых систем и их динамики в периоды геомагнитных возмущений.

Данная работа поддержана программой Президиума РАН «Физика нейтрино и нейтринная астрофизика» в рамках проекта «Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным и стратосферным наблюдениям».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Юдина М.В. и др. Вариации планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания космических лучей в октябре–ноябре 2003 г. // Геомагнетизм и астрономия. 2005. Т. 45, № 1. С. 58–63.

Дворников В.М., Кравцова М.В., Луковникова А.А., Сдобнов В.Е. Вариации жесткостного спектра и анизотропии космических лучей в период солнечно-протонного события 20 января 2005 г. // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. IX Конференция молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде». Иркутск, 2006. С. 207–210.

Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Изменения жесткости геомагнитного обрезания в Иркутске // Изв. РАН. Серия физ. 2009. Т. 73, № 3. С. 388–392.

Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 1971. 289 с.

Тясто М.И., Данилова О.А., Птицына Н.Г. и др. Жесткости обрезания космических лучей в период геомагнитных бурь: сравнение магнитосферных моделей // Геомагнетизм и астрономия. 2004. Т. 44, № 3. С. 296–302.

Ahluwalia N.S., Ygbuhay R.C., Duldig M.L. Two intense Forbush decreases of solar activity cycle 22 // Adv. Space Res. 2009. V. 44. P. 58–63.

Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Universal Heliophysical Processes. Proc. of IAU Symposium. 2009. N 257. P. 439–450.

Baisultanova L.M., Belov A.V., L.I. Dorman, Yanke V.G. Magnetospheric effects in cosmic rays during forbush-decreases // Proc. 20th ICRC. 1987. Moscow. V. 4. P. 231–234.

Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Cane H.V. Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N A6. P. 12579–12591.

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. 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.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск