

УДК 539.163

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРА И АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПЕРИОД GLE В ДЕКАБРЕ 2006 г.

В.М. Дворников<sup>†</sup>, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов

## CHARACTERISTICS OF COSMIC RAY SPECTRUM AND ANISOTROPY DURING GLE IN DECEMBER 2006

V.M. Dvornikov<sup>†</sup>, M.V. Kravtsova, V.E. Sdobnov

По данным наземных измерений интенсивности космических лучей (КЛ) на мировой сети станций методом спектрографической глобальной съемки исследованы вариации жесткостного спектра и анизотропии КЛ в декабре 2006 г. Показано, что 13 декабря в 04:00 UT наблюдалась наибольшая степень анизотропии (до ~50 %) с максимальной интенсивностью частиц с жесткостью 4 ГВ в антисолнечном направлении (асимптотическое направление ~-25°, ~160°). При совместном анализе наземных и спутниковых измерений протонов в энергетическом интервале от единиц МэВ до десятков ГэВ определены параметры жесткостного спектра КЛ, которые отражают электромагнитные характеристики полей гелиосферы за исследуемый период. На основе анализа результатов дано объяснение наблюдаемой анизотропии и вариаций КЛ в широком энергетическом диапазоне.

Variations of the rigidity spectrum and cosmic ray (CR) anisotropy in December 2006 are investigated using the method of spectrographic global survey from ground-based measurements of the CR intensity at the world network of stations. It is shown that the highest degree of anisotropy (up to ~50 %) with maximal intensity of particles with 4 GV rigidity in the antisolar direction (asymptotic direction ~ -25°, ~160°) was observed during the CR flare on 13 December at 04:00 UT. CR rigidity spectrum parameters that reflect electromagnetic characteristics of heliospheric fields for the period under investigation are determined with the complex analysis of ground-based and satellite measurements of protons in the energy range from units of MeV to tens of GeV. The analysis provides an explanation of the observable anisotropy and CR variations in a wide energy range.

### Введение

Декабрь 2006 г. характеризуется целой серией событий на Солнце, связанных с активной областью 0930. В частности, на космическом аппарате GOES-11 5 декабря в 11:40 UT было зарегистрировано возрастание потоков протонов в энергетическом диапазоне 0.8–4 МэВ, вызванных вспышкой на Солнце (X9) с координатами S07, E68, произошедшей 05.12.2006 г. (начало в 10:21, время максимума в 10:35 и конец вспышки в 10:45 UT). Начало возрастания более энергичных частиц произошло значительно позднее (примерно в 16–17 UT) [1].

Солнечная вспышка (X3), произошедшая 13 декабря, началась в 02:17 UT в области с координатами S05, W23, сопровождалась корональным выбросом массы (КВМ) и солнечным протонным событием (СПС). Начало возрастания интенсивности низкоэнергичных частиц было зарегистрировано на GOES-11 в 03:25–03:30 UT. Начало возрастания интенсивности высокоэнергичных космических лучей (КЛ) 13 декабря 2006 г. было зарегистрировано наземной сетью нейтронных мониторов (GLE (ground level event)) в 02:50 UT. Эти события вызвали возмущения в межпланетной среде, а также в ионосфере и магнитосфере Земли, самые значительные из которых произошли 6 и 15 декабря. В частности, 15 декабря наблюдалась сильная геомагнитная буря ( $D_{st} \sim -150$  нТл).

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 [2], отражают электромагнитные характеристики межпланетной среды.

### Данные и метод

Для анализа использовались усредненные за часовые интервалы времени и откорректированные на геометрический фактор данные наблюдений интенсивности протонов в энергетических диапазонах 4–9, 9–15, 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ, полученные на спутнике GOES-11 [3]. Данные о вариациях интенсивности КЛ более высоких энергий были получены методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [4] по наземным измерениям на мировой сети нейтронных мониторов (32 станции). Были проанализированы вариации жесткостного спектра, анизотропии и изменения пороговых жесткостей геомагнитного обрезания за период с 1 по 31 декабря 2006 г. относительно базового уровня 10 июня 2004 г.

Для описания жесткостного спектра КЛ в широком диапазоне энергий использовалось выражение, полученное в работе [2]. Параметры жесткостного спектра и анизотропии КЛ определялись за каждый час наблюдений на всем исследуемом периоде.

### Обсуждение результатов и выводы

При сравнении временных вариаций параметров жесткостного спектра КЛ с временными профилями интенсивности низкоэнергичных протонов (рис. 1) можно сделать вывод, что возрастание интенсивности КЛ низких энергий обусловлено ускорением частиц межпланетной среды поляризационными и вихревыми электрическими полями (возрастание параметров  $\alpha$  и  $\beta$ ), которое началось 5 декабря в момент пересечения Землей токового слоя.

Из рис. 2 следует, что используемый вид спектра хорошо описывает наблюдаемую зависимость интенсивности КЛ от их жесткости на всем анализируемом временном интервале, за исключением моментов

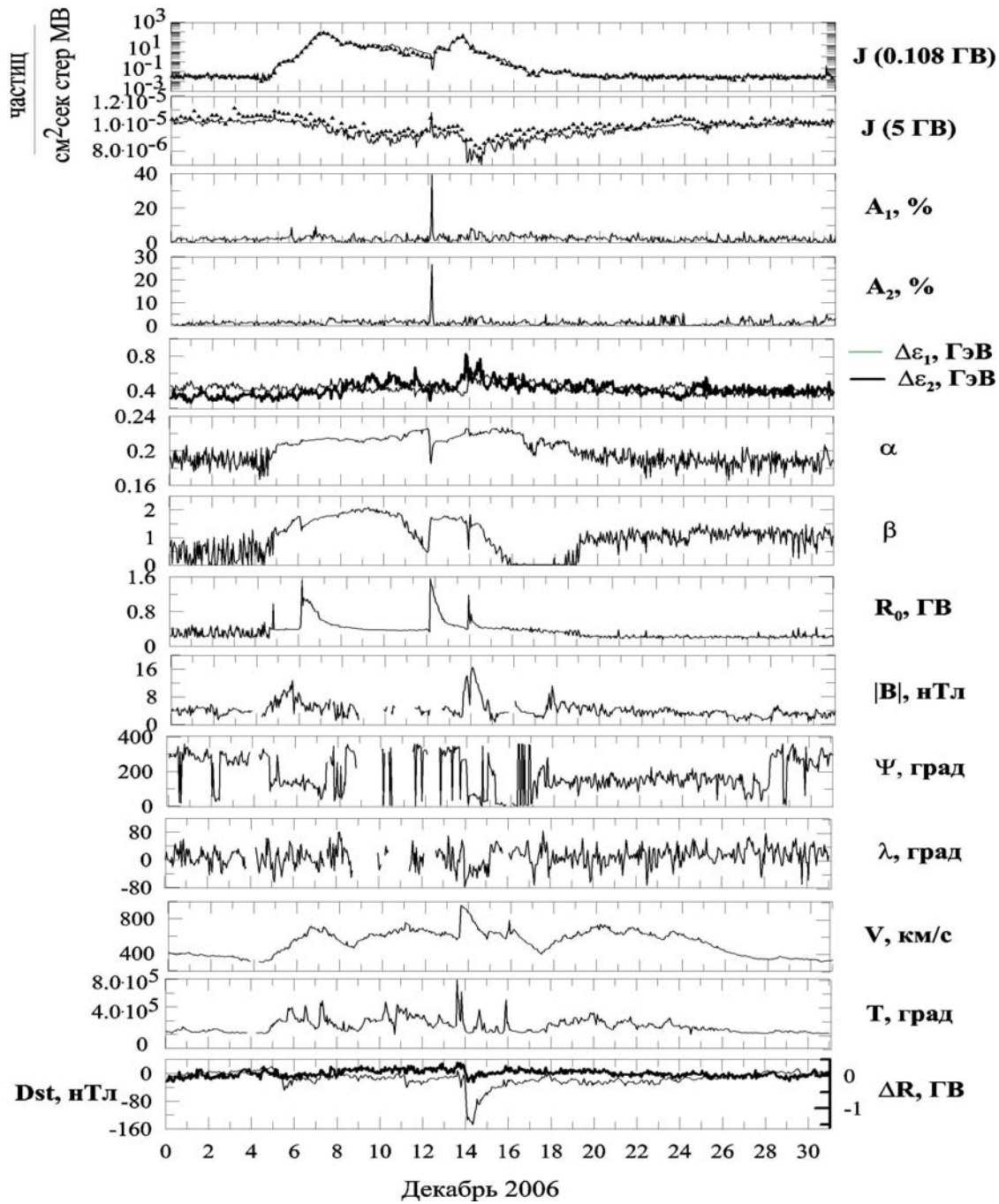


Рис. 1. На двух верхних панелях треугольниками представлены данные наблюдений протонных интенсивностей в энергетических интервалах 4–9 МэВ (0.108 ГВ) и 5 ГВ, сплошными кривыми – результаты расчетов с использованием модельного спектра и полученных значений его параметров. На третьей панели представлены среднечасовые значения амплитуды первой сферической гармоники, на четвертой – второй гармоники в угловом распределении частиц с жесткостью 4 ГВ. На следующих четырех панелях представлены параметры жесткого спектра  $\Delta\epsilon_1$ ,  $\Delta\epsilon_2$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $R_0$ . Далее нанесены соответственно модуль ММП, углы  $\Psi$  и  $\lambda$ , характеризующие ориентацию вектора ММП в межпланетном пространстве, а также скорость и температура солнечного ветра (СВ). На нижней панели представлены значения изменений ЖГО при  $R_c = 4$  ГВ совместно с  $D_{st}$ -индексом.

04:00 и 05:00 UT 13 декабря, т. е. на начальной стадии GLE. Из данного обстоятельства 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 СКЛ, которые, в свою очередь, из-за обмена энергией с ГКЛ и частицами плазмы СВ перемещаются в область меньших энергий и регистрируются только в ко-

роткие моменты (например, в 04:00, 05:00 UT 13.12.06 г.), о чем можно судить по расхождениям между модельным и наблюдаемым спектрами в области малых энергий.

Поведение параметра  $R_0$  указывает на то, что ускорительные процессы сопровождаются укрупнением областей с нестационарными электромагнитными полями. При возрастании параметра  $R_0$  до значений, превышающих 1–2 ГВ (при соответствующих значениях параметров  $\alpha$  и  $\beta$ ), наблюдаются GLE.

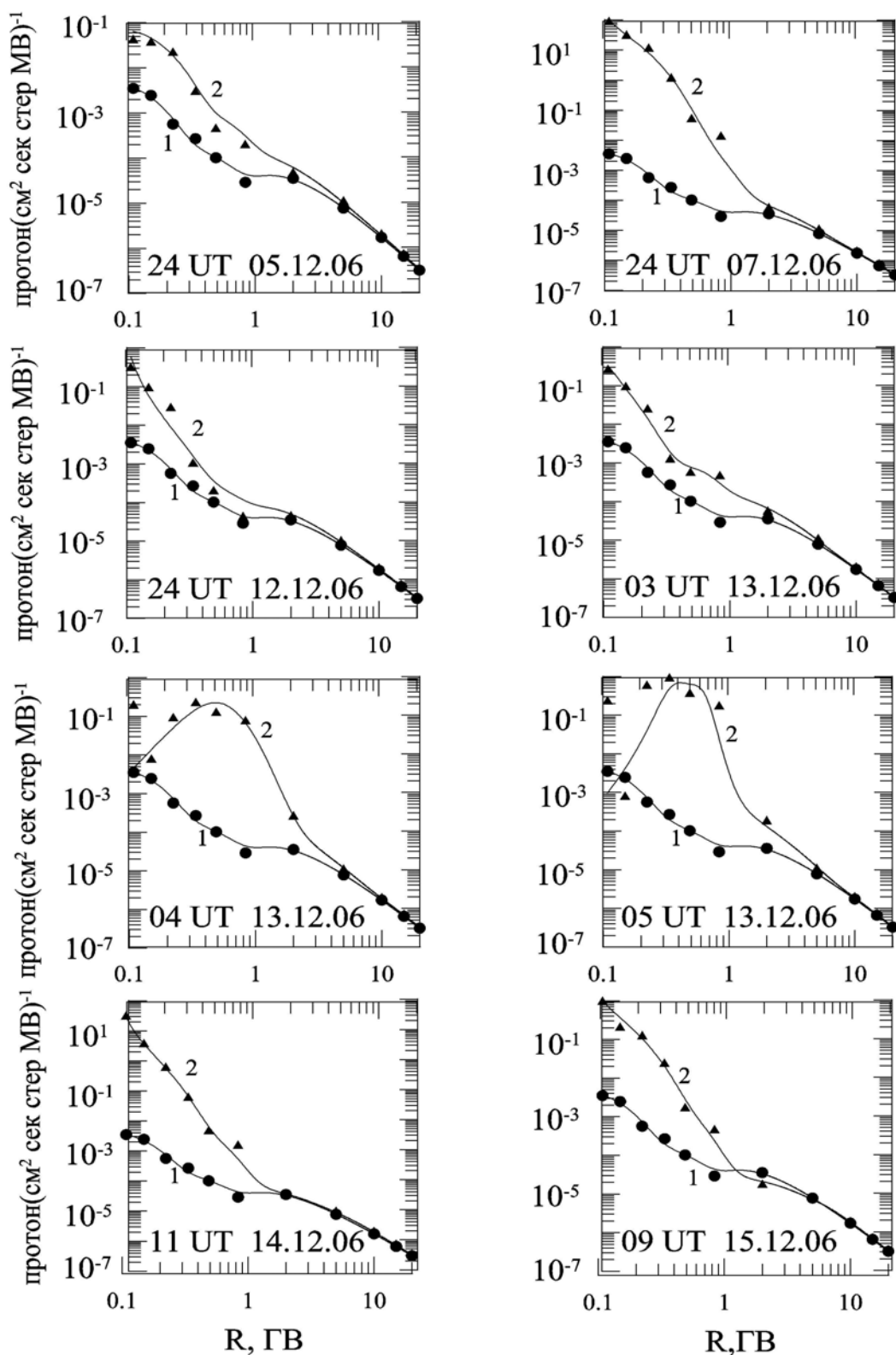


Рис. 2. Дифференциальные жесткостные спектры КЛ в отдельные моменты времени исследуемого периода совместно с фоновым спектром КЛ. Расчетный фоновый спектр показан кривой 1, а данные наблюдений – точками. Результаты расчетов модельного спектра в моменты времени, указанные на графиках, обозначены кривой 2, а треугольники – данные наблюдений.

Как следует из поведения параметров  $A_1$  и  $A_2$  (рис. 1), в момент регистрации GLE наблюдается значительная анизотропия. Анализ распределения частиц с жесткостью  $R = 4$  ГВ по направлениям

прихода (рис. 3) указывает на то, что максимальные потоки КЛ наблюдались в 04:00 UT из направления  $170^\circ, -20^\circ$  (~150 %), т. е. практически из антисолнечного направления.

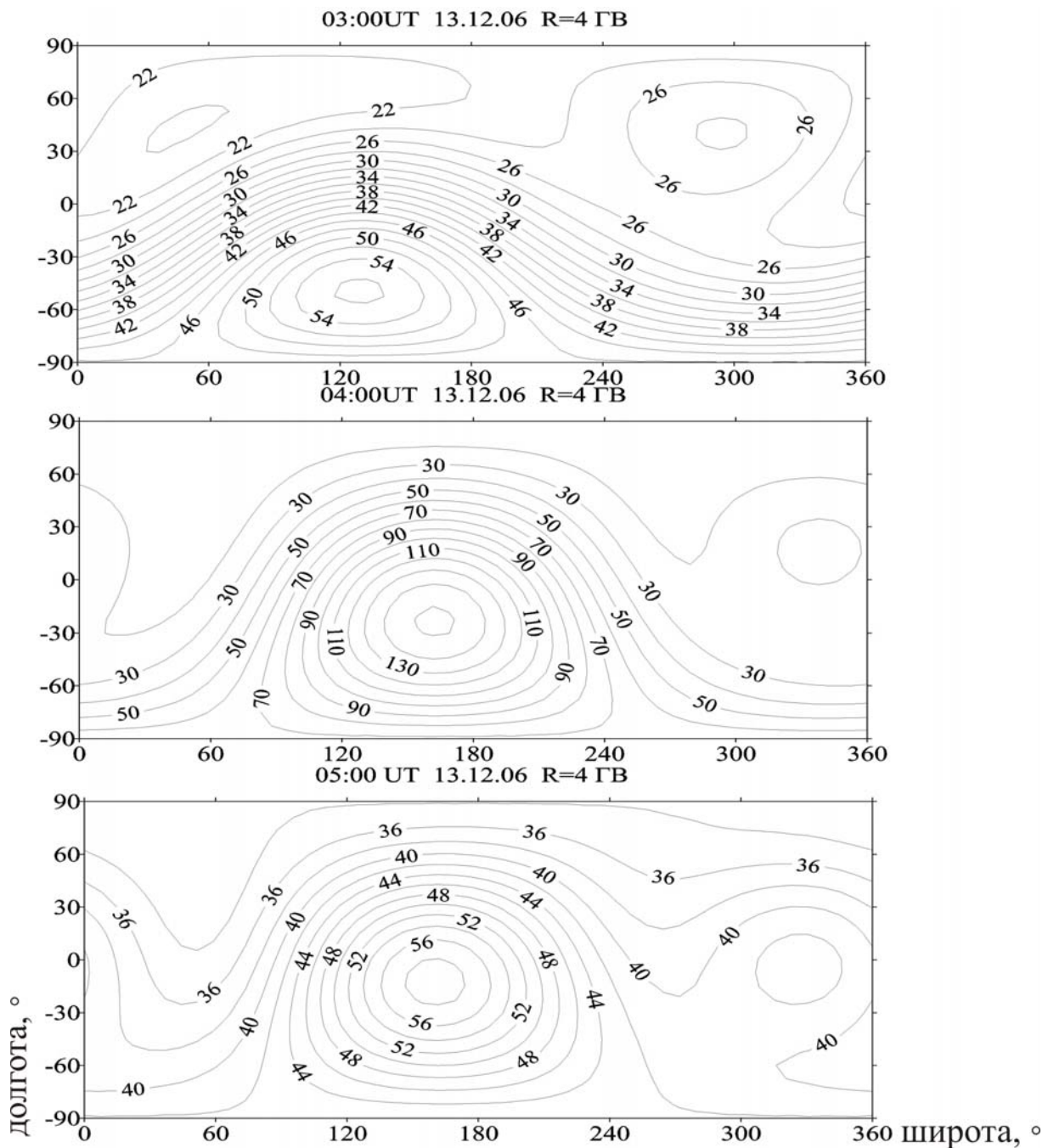


Рис. 3. Относительные изменения интенсивности КЛ с  $R = 4$  ГВ в зависимости от асимптотических направлений в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени 13 декабря 2006 г. в период наблюдения GLE.

На основе полученных результатов и с учетом результатов, полученных при исследовании вариаций параметров жесткого спектра КЛ накануне СПС [5], предложен следующий сценарий ускорения КЛ в солнечной короне и гелиосфере. Предполагается, что магнитные поля над активными областями на Солнце имеют волокнистую структуру. Если магнитные поля волокнистых структур возрастают во времени, то возникает дрейф частиц (с ларморовским радиусом, меньшим поперечных размеров этих структур) внутрь волокон и их ускорение за счет бетатронного механизма. Вследствие возрастания токов, формирующих данные структуры, воз-

растает электродинамическая сила со стороны собственного магнитного поля данных токов, стремящаяся растянуть токовый контур. Эта сила обычно уравнивается электродинамическими силами соседних токовых контуров, газовым давлением и гравитационными силами. Однако если ток превосходит определенное критическое значение, баланс сил может нарушиться, и произойдет слияние двух соседних токовых контуров или разрыв токовой цепи, сопровождающийся взрывным процессом с высвобождением ускоренных частиц. В результате этого произойдет укрупнение поперечных размеров волокнистых структур и исчезновение мелкомасштаб-

ных полей. Распространяясь в неоднородных полях солнечной короны и гелиосферы, высыпавшиеся пучки ускоренных частиц поляризуются из-за того, что протоны и электроны дрейфуют в противоположные стороны, в результате чего, при пространственной неоднородности плотности ускоренных частиц, происходит разделение зарядов и возникает разность потенциалов между границами пучка вдоль траекторий магнитного дрейфа. Данное обстоятельство приводит к генерации возрастающего во времени поляризационного электрического поля и, как следствие этого, поляризационного дрейфа фоновых частиц плазмы СВ, солнечной короны и ГКЛ вдоль данного поля, т. е. к ускорению частиц солнечной короны и межпланетной среды, ларморовский радиус которых меньше поперечного размера данного пучка.

Из-за возникновения деполяризационных продольных токов формируется токовая система и генерируется магнитное поле, а следовательно, и вихревое электрическое поле, ускоряющее частицы за счет бетатронного механизма, и т. д. Таким образом, происходит обмен энергией между ускоренными частицами и фоновыми частицами плазмы солнечной короны, СВ и ГКЛ, формирование за счет этого токовых структур гелиосферы и генерация структур ММП, т. е. процесс ускорения и распространения

частиц в гелиосфере является самосогласованным с электромагнитными полями.

Данная работа частично поддержана комплексным интеграционным проектом СО РАН-2006 № 3.10 и программой Президиума РАН «Нейтринная физика» в рамках проекта «Исследование модуляционных эффектов космических лучей методом наземного и стратосферного мониторинга».

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. <http://sgd.ngdc.noaa.gov/sgd/>
2. Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Correlations between variations of cosmic rays spectrum and interplanetary medium parameters // Proc. 2-nd Internat. Symp. SEE-2005, Nor-Amberd, Armenia. 2006. P. 172–175.
3. <http://spidr.ngdc.gov/spidr/index.html>
4. 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. 24209–24219.
5. Дворников В.М., Кравцова М.В., Луковникова А.А., Сдобнов В.Е. Вариации жесткого спектра космических лучей в период событий января 2005 г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71, № 7. С. 975–977.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*