

Федеральное государственное бюджетное учреждения науки
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения
Российской академии наук

УДК 524.1
На правах рукописи

Кравцова Марина Владимировна

**ЭФФЕКТЫ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ
ПРИ СПОРАДИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ В ГЕЛИОСФЕРЕ**

Специальность 01.03.03 – физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Сдобнов Валерий Евгеньевич

Официальные оппоненты:

Кичигин Геннадий Николаевич,

доктор физико-математических наук,

ИСЗФ СО РАН, ведущий научный сотрудник

Янчуковский Валерий Леонидович,

доктор физико-математических наук,

ГС СО РАН, заведующий лабораторией

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

Защита диссертации состоится 12 сентября 2012 г. в « » часов на заседании диссертационного совета Д.003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН по адресу: 664033, Иркутск, Лермонтова, 126-А, а/я 291, ИСЗФ СО РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЗФ СО РАН

Автореферат разослан « » _____ 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.003.034.01

кандидат физико-математических наук В.И. Поляков



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Важное место в исследованиях по физике межпланетного пространства занимает изучение вариаций космических лучей (КЛ) как галактического, так и солнечного происхождения, которые реагируют на динамические процессы в межпланетном пространстве и могут быть использованы как источник информации об этих процессах.

Наблюдаемые на поверхности Земли вариации КЛ являются интегральным результатом различных солнечных, гелиосферных и атмосферных явлений. На поверхности Земли интенсивность КЛ зависит от метеорологических параметров, например, температуры и давления воздуха, состояния геомагнитного поля, электромагнитной обстановки в Солнечной системе и физических условий в Галактике. В соответствии с этим вариации КЛ делят на три класса: I – метеорологического происхождения, II – обусловленные изменениями магнитного поля Земли и III – связанные с изменениями электромагнитных полей солнечного ветра (СВ), т. е. с солнечной активностью. К III классу относятся, в частности, внезапные мощные возрастания потока КЛ, связанные с солнечными вспышками, а также понижения интенсивности КЛ (форбуш-эффекты), которые сопровождаются, как правило, геомагнитными возмущениями.

Данные о солнечных космических лучах (СКЛ) (энергетический спектр, анизотропия, химический состав, времена запаздывания их регистрации на Земле по отношению к моментам генерации на Солнце) важны для выяснения механизмов ускорения частиц в солнечных вспышках и их распространения в межпланетной среде. Вариации галактических космических лучей (ГКЛ) используются для изучения крупномасштабных возмущений в гелиосфере (корональных выбросов массы (КВМ), ударных волн). Эти возмущения, достигая Земли, вызывают геомагнитные бури, которые, в свою очередь, оказывают существенное воздействие на различные стороны жизнедеятельности человека.

Наблюдения и исследования вариаций интенсивности СКЛ и ГКЛ являются мощным инструментом как при проведении фундаментальных исследований, так и при решении ряда практических задач мониторинга и прогноза космической погоды.

Данная диссертационная работа посвящена изучению эффектов в КЛ при спорадических явлениях в гелиосфере. Исследования направлены на решение одной из наиболее актуальных задач солнечно-земной физики – прогноза солнечных протонных событий (СПС), – которая до настоящего времени не решена в рамках ни национальных, ни международных программ.

Актуальность проблемы

За последние десятилетия накоплен большой материал о вариациях жесткого спектра и анизотропии КЛ при различных проявлениях солнечной активности в межпланетном пространстве, который значительно расширил и изменил существующие представления о процессах ускорения и модуляции высокоэнергичных частиц в гелиосфере.

В настоящее время существует два подхода к проблеме модуляции КЛ в гелиосфере. Согласно первому, модуляция обусловлена изменением плотности КЛ за счет их «выноса» мелкомасштабными магнитными неоднородностями, «вмороженными» в плазму СВ, диффузией их вдоль спирального межпланетного магнитного поля (ММП) и, как полагают, адиабатическими потерями [1]. Амплитуда модуляции в линейном приближении пропорциональна скорости СВ и размеру области модуляции и обратно пропорциональна коэффициенту диффузии. Анизотропия в распределении частиц по направлениям прихода мала.

В соответствии со вторым подходом предполагается, что 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], которые в значительной мере определяются структурами ММП типа «магнитных ловушек». Анизотропия КЛ может достигать значительной величины и наряду с первой гармоникой иметь и более высокие [3].

Для решения вопроса об адекватности того или иного подхода в предлагаемой работе исследуются эффекты в КЛ при экстремальных событиях в гелиосфере в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями.

Цель работы

Изучение динамических процессов в гелиосфере путем мониторинга электромагнитных характеристик межпланетной среды по эффектам в КЛ.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи.

1. Анализ вариаций КЛ по данным наземных и спутниковых наблюдений с 1986 по 2009 г. совместно с исследованием гелио- и геофизической обстановки.
2. Поиск особенностей поведения параметров жесткостного спектра КЛ, связанных с появлением на орбите Земли потоков КЛ повышенной интенсивности.
3. Оценка достоверности информации о межпланетной среде, получаемой по вариациям КЛ, путем сопоставления расчетов с результатами прямых наблюдений в гелиосфере и магнитосфере Земли.

При решении поставленных задач использовался разработанный в ИСЗФ СО РАН метод спектрографической глобальной съемки (СГС), позволяющий по наземным наблюдениям КЛ на мировой сети станций нейтронных мониторов получать информацию о вариациях углового и энергетического распределения первичных КЛ за пределами магнитосферы Земли, а также об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания (ЖГО) за каждый час наблюдений.

Научная новизна работы

С помощью использованного в диссертации оригинального метода СГС выполнен анализ эффектов в КЛ при спорадических явлениях в гелиосфере, произошедших в отдельные моменты с 1986 по 2009 г. Полученные результаты достаточно убедительно интерпретированы в рамках модели модуляции КЛ регулярными полями гелиосферы.

Достоверность результатов

Диссертационная работа основана на сопоставлении информации, получаемой по данным о вариациях интенсивности КЛ, ориентации ММП, изменениях ЖГО, вариациях анизотропии и жесткостного спектра КЛ, с соответствующей информацией, следующей из независимых источников (спутниковых измерений ориентации и модуля ММП, временных профилей интенсивности низкоэнергичных частиц), а также из данных по геомагнитной активности.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию процессов модуляции КЛ и позволяют диагностировать электромагнитную и радиационную обстановку в гелиосфере и магнитосфере Земли на количественной основе.

Работа выполнялась в рамках плана научно-исследовательских работ ИСЗФ СО РАН при поддержке программ Президиума РАН № 6 «Нейтринная физика», № 9 «Физика нейтрино и нейтринная астрофизика», интеграционного проекта ИСЗФ СО РАН № 3.10 «Космические лучи в гелиосфере».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Подтверждена модель модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями СВ по результатам исследования эффектов в КЛ методом СГС при спорадических явлениях в гелиосфере.

2. Обнаружено возрастание потоков низкоэнергичных протонов на орбите Земли, которое происходит раньше, чем возрастание потоков более энергичных частиц, что может являться дополнительной информацией при изучении механизмов ускорения и распространения КЛ в межпланетном пространстве.

3. Установлено, что определяющим фактором возрастания потоков ГКЛ на орбите Земли в октябре 2009 г. по сравнению с апрелем 2008 г. является уменьшение потерь энергии при движении частиц в регулярных электромагнитных полях гелиосферы.

4. Показано, что максимальное количество отказов спутниковой электроники, наблюдавшееся с 19 по 26 октября 1989 г., было обусловлено суперпозицией двух факторов: возрастанием интенсивности КЛ за пределами магнитосферы и одновременным понижением ЖГО вследствие мощных геомагнитных возмущений.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников. Объем диссертации составляет 118 страниц, 31 рисунок. Библиографический список включает 114 источников.

Апробация работы

Результаты, послужившие основой диссертации, докладывались на следующих научных мероприятиях.

- Международные конференции: Third Russian-Chinese Conference on Space Weather, Irkutsk, 2002; The 27th General Assembly of the European Geophysical Soci-

ety (EGS), Nice, France, 2002; «Солнечно-земная физика», Иркутск, 2004; Solar Extreme Events: Fundamental Science and Applied Aspects (SEE-2005), Intern. Symp., Nor Amberd, Armenia, 2005; VII Russian-Chinese Workshop on Space Weather, Irkutsk, 2006; The 3rd Intern. Symp. SEE 2007 Athens, Greece, 2007; 30th Intern. Cosmic Ray Conf., Merida, Mexico, 2007; Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике, Иркутск, 2003–2011; The 32th ICRC, China, Beijing, 2011.

- Всероссийские конференции: Всероссийская конференция по КЛ, Москва, 2004, 2006, Санкт-Петербург, 2008; «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности», Троицк, 2005; «Современные проблемы космической физики», Якутск, 2008; «Солнечно-земная физика», Иркутск, 2010; VIII конф. молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 2011; 17 Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых, Екатеринбург, 2011; «Базы данных, инструменты и информационные основы полярных геофизических исследований», Троицк, ИЗМИРАН, 2011.

- Семинары ИСЗФ СО РАН, Иркутск.

Публикации

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, отражены и опубликованы (2002–2011 гг.) в 33 научных работах, из которых 12 – в научных журналах, включенных в перечень ВАК, 21 – в трудах перечисленных выше конференций и семинаров.

Личный вклад автора

Автор проделал большую работу по обработке и анализу экспериментального материала. В совместных исследованиях автору принадлежит равное участие на всех этапах: от постановки задачи, проведения численных расчетов, анализа данных, обсуждения и интерпретации полученных результатов до получения выводов и написания статей.

В последние годы автор является соисполнителем по теме Программы Президиума РАН «Нейтринная физика», а с 2011 г. – ответственным исполнителем по этой теме.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика диссертационной работы: обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые автором на защиту.

В **первой главе** представлен обзор физических основ модуляции КЛ в гелиосфере. Изложены основные положения конвективно-диффузионной модели модуляции КЛ. Указано на существующие трудности интерпретации с позиции данной модели ряда наблюдаемых факторов, в том числе сильной анизотропии в распределении КЛ по питч-углам в ММП в периоды форбуш-понижений.

В качестве альтернативной описана модель модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы, разрабатываемая в ИСЗФ СО РАН, а также приведено аналитическое выражение для описания жесткостного спектра КЛ [4], полученное на основе решения кинетического уравнения в дрейфовом приближении в предположении постоянства плотности частиц вдоль траектории их движения в фазовом пространстве, т. е. при выполнении теоремы Лиувилля

$$J(R) = C \frac{(\varepsilon^2 - \varepsilon_0^2)^{3/2}}{\varepsilon[(\varepsilon + \Delta\varepsilon)^2 - \varepsilon_0^2]} \left(\frac{\varepsilon + \Delta\varepsilon}{T_0 + \varepsilon_0} \right)^{-\gamma}, \quad (1)$$

где ε – полная энергия частиц с жесткостью R ; ε_0 – энергия покоя; T_0 – кинетическая энергия, при которой интенсивность КЛ соответствующей жесткости равна C ; γ – спектральный индекс галактического спектра КЛ; $\Delta\varepsilon$ – изменение полной энергии частиц в электромагнитных полях гелиосферы, определяемое выражением

$$\Delta\varepsilon = \begin{cases} \Delta\varepsilon_{\text{pt}} + \varepsilon - \sqrt{\beta(\varepsilon^2 - \varepsilon_0^2) + \varepsilon_0^2} + \varepsilon(1 - e^{\alpha/2}) & \text{при } R < R_0, \\ \Delta\varepsilon_{\text{pt}} - \varepsilon(R_0)(1 - e^{\alpha/2}) & \text{при } R > R_0. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $\Delta\varepsilon_{\text{pt}} = ZeU$ (Ze – заряд частицы; U – потенциал индуцированного электрического поля гелиосферы), $\beta \propto B/B_0$ (B_0 и B – напряженности фонового и переменного во времени ММП соответственно); $\alpha = E_{\text{pl}}^2/B^2$, где E_{pl} – напряженность поляризационного электрического поля, возникающего в гелиосфере при распространении пучков ускоренных частиц; R_0 – жесткость частиц, ларморовский радиус которых равен размеру областей с нестационарными электромагнитными полями, в которых происходит их ускорение.

Во **второй главе** рассматривается уравнение вариаций КЛ и современные методы исследования КЛ по данным наземных наблюдений. Дается критический анализ существующих методов изучения вариаций КЛ. Детально описан метод СГС, который использован в диссертационной работе для изучения вариаций функции распределения КЛ и изменений планетарной системы ЖГО.

В отличие от существующих методов СГС позволяет использовать для анализа весь имеющийся комплекс наземной регистрирующей аппаратуры (мировая сеть нейтронных мониторов, расположенных на разных уровнях атмосферы 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, по фазе второй гармоники получать информацию об ориентации ММП, а также определять вариации планетарной системы ЖГО за каждый час наблюдений или за меньшие временные интервалы в периоды наземных возрастаний интенсивности КЛ, так называемых событий GLE (Ground Level Enhancement) во время СПС.

В **третьей главе** приводятся результаты исследования эффектов в КЛ при спорадических явлениях в гелиосфере методом СГС в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы.

По данным наземных и спутниковых измерений исследованы временные профили интенсивности КЛ различных энергий, поведение анизотропии КЛ и изменения ЖГО. Так подробно анализируются события форбуш-понижений (март 1991 г., октябрь–ноябрь 2003 г., ноябрь 2004 г., август 2005 г.) и GLE (август–октябрь 1989 г., 15 июня 1991 г., 20 января 2005 г., 13 декабря 2006 г.).

Кроме того, исследована природа всплесков интенсивности низкоэнергичных КЛ (март 1986 г.) и соответствие расчетов модельного спектра экспериментальным данным во время СПС 2004–2005 гг., а также особенности модуляции КЛ в период минимума 24 солнечного цикла на примере апреля 2008 г. и октября 2009 г.

Для каждого события приводится сводка гелио- и геофизической обстановки, включая данные о вспышке на Солнце, состоянии ММП, геомагнитной возмущенности, определены жесткостные спектры КЛ на различных фазах развития данных событий и получены мгновенные значения параметров спектра.

Показано, что используемый вид спектра удовлетворительно описывает временные профили интенсивности и жесткостные спектры относительных изменений интенсивности КЛ во всех исследуемых событиях.

Изменение интенсивности КЛ (в рамках используемой модели) происходит, во-первых, вследствие временных вариаций и пространственной неоднородности потенциала индуцированного электрического поля (параметр $\Delta\epsilon_{pt}$), во-вторых, вследствие ускорения частиц в петлеобразных структурах корональных и межпланетных магнитных полей, переменных во времени (параметр β), и, в-третьих, из-за ускорения фоновых частиц поляризационными электрическими полями, возникающими при распространении ускоренных в солнечной короне частиц в неоднородных полях гелиосферы, особенно в окрестностях токовых слоев (параметр α). Форма жесткостного спектра КЛ в энергетическом диапазоне от единиц МэВ до десятков ГэВ, определяется соотношением между параметрами спектра $\Delta\epsilon_{pt}$, α и β , характеризующими изменение энергии частиц вследствие указанных механизмов, а также параметра R_0 , характеризующего размеры областей по энергетической координате, в которых доминируют эффекты нестационарных электромагнитных полей. В области энергий менее единиц МэВ, по-видимому, необходимо учитывать дополнительный источник, обусловленный ускорением частиц плазмы солнечной короны и СВ.

На основе сравнения временных вариаций параметров жесткостного спектра КЛ с временными профилями интенсивности КЛ установлено, что накануне СПС происходят изменения электромагнитных характеристик гелиосферы. В частности, можно видеть, что за несколько часов перед СПС 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 ММП (параметр $\Delta\epsilon_1$).

Понижение интенсивности КЛ с жесткостью $R > R_0$ в периоды форбуш-понижений обусловлено возрастанием параметра $\Delta\epsilon_{pt}$ (потери энергии в индуцированных электрических полях) и потерями энергии частиц при преодолении

разности потенциалов, возникающих при поляризации потоков ускоренных частиц при их распространении в полях гелиосферы.

GLE наблюдаются в том случае, когда значения R_0 превышают $\sim 1\text{--}2$ ГВ при соответствующих значениях параметров α и β , за исключением тех случаев, когда возрастания интенсивности в основном обусловлены малыми значениями параметра $\Delta\epsilon_{\text{pt}}$.

Данное обстоятельство позволяет надеяться на возможность прогноза СПС при мониторинге электромагнитных характеристик гелиосферы по эффектам в КЛ.

Раздел 3.1 посвящен анализу вариации функции распределения и жесткости геомагнитного обрезания КЛ во время форбуш-понижений.

В разделе 3.1.1 анализируется форбуш-понижение, наблюдавшееся в марте 1991 г. Для анализа использовались данные 44 нейтронных мониторов (14 высокоширотных, 24 – среднеширотных и 6 низкоширотных), исправленные на давление и усредненные за часовые интервалы. Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 3 марта 1991 г.

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 жесткости ($\Delta J/J \sim R^{-\gamma}$), показатель спектра вариаций γ в жесткостном диапазоне 10–100 ГВ в это время составил ~ -0.88 .

Амплитуды первой (A_1) и второй (A_2) гармоник 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 .

Зависимость изменений пороговых ЖГО (ΔR_c) от пороговых жесткостей R_c в отдельные моменты геомагнитного возмущения в марте 1991 г. показывает, что 24 марта в 20:00 UT радиус токового кольца составил ~ 3 радиусов Земли; 24 марта в 23:00 UT, 25 марта в 01:00 UT, 07:00–08:00 UT, 10:00 UT и 12:00 UT – ~ 5 радиусов Земли, а 25 марта в 09:00 UT и 13:00 UT радиус токового кольца изменялся до ~ 3 радиусов Земли. Максимальные значения понижения ЖГО в этот период наблюдались на среднеширотных станциях ($R_c \sim 3\text{--}5$ ГВ).

Из анализа относительных изменений интенсивности КЛ с $R=4$ ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат для различных моментов времени следует, что 6, 12, 22 и 24 марта (02 UT) доминировала первая гармоника. В эти моменты времени интенсивность КЛ была понижена на $\sim 30\%$ из направления $\psi \sim 280^\circ$, $\lambda \sim 10^\circ$; $\sim 40\%$ – из направления $\psi \sim 90^\circ$, $\lambda \sim 28^\circ$; $\sim 55\%$ – из направления $\psi \sim 90^\circ$, $\lambda \sim 12^\circ$; $\sim 14\%$ – из направления $\psi \sim 35^\circ$, $\lambda \sim -15^\circ$ и $\psi \sim 225^\circ$, $\lambda \sim -2^\circ$. 7 и 24 марта (17 UT) доминировала вторая гармоника, поток интенсив-

ности КЛ был повышен на 10 % с фазой $\psi \sim 100^\circ$, $\lambda \sim -45^\circ$ и $\psi \sim 260^\circ$, $\lambda \sim 60^\circ$ и на 50 % с фазой $\psi \sim 182^\circ$, $\lambda \sim -2^\circ$. 25 марта в 04 и 21 UT во время магнитной бури ($D_{st} \sim -300$ нТл) доминировала первая гармоника, наблюдалось понижение интенсивности КЛ на 38 % из направления $\psi \sim 190^\circ$, $\lambda \sim 30^\circ$ и на 71 % – из направления $\psi \sim 110^\circ$, $\lambda \sim 15^\circ$.

В разделе 3.1.2 рассматриваются события октября–ноября 2003 г. Для анализа использовались данные 38 станций нейтронных мониторов и спутника GOES-11. Амплитуды вариаций отсчитывались относительно среднего уровня 12 октября 2003 г.

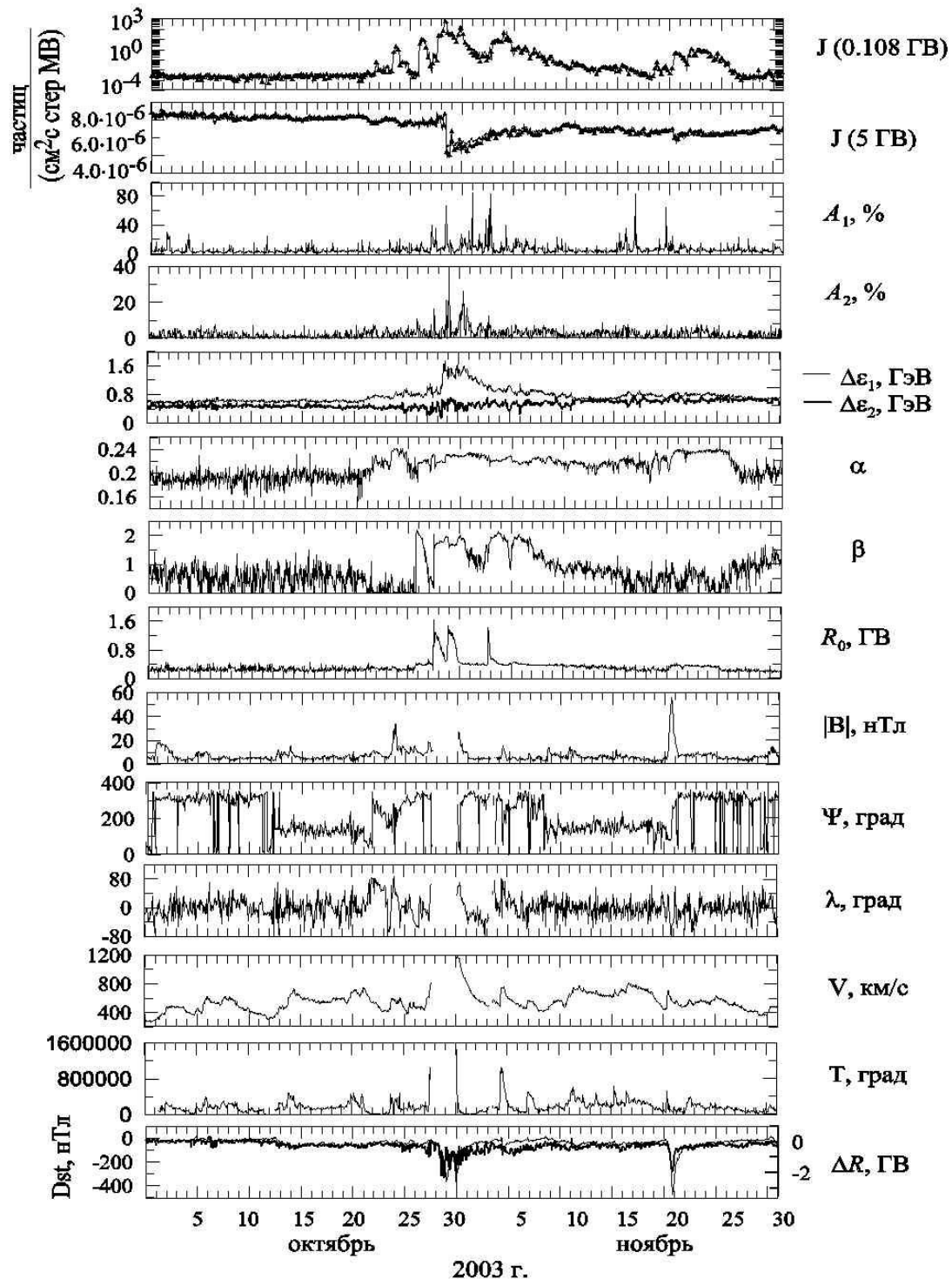


Рис. 1.

На рис. 1 на двух верхних панелях сплошными кривыми представлены временные профили интенсивности частиц с $R=0.108$ и 5 ГВ, рассчитанные с использованием найденных параметров спектра, а треугольниками – данные наблюдений. На следующих двух панелях даны амплитуды первой A_1 и второй A_2 гармоник углового распределения КЛ с жесткостью $R=4$ ГВ. Следует отметить, что возрастание амплитуды второй гармоники свидетельствует о том, что Земля в этот момент находилась внутри петлеобразной структуры ММП. На следующих четырех панелях представлены значения параметров жесткостного спектра $\Delta\epsilon_1$ (тонкая линия), $\Delta\epsilon_2$ (толстая линия), α , β , R_0 , определенные за исследуемый период. Далее на пяти панелях даны значения модуля ММП, углов, характеризующих ориентацию вектора ММП в геоцентрической эклиптической системе координат, скорости и температуры плазмы СВ. На нижней панели показаны значения D_{st} -индекса (тонкая линия) и вариаций ЖГО при $R_c=4$ ГВ (толстая линия), полученные при анализе методом СГС.

Судя по поведению параметра R_0 , который изменяется в пределах от ~ 0.2 до ~ 1.6 ГВ, размер областей с нестационарными электромагнитными полями на орбите Земли составляет $\sim 10^{10} - 10^{11}$ см. Данный размер на один-два порядка меньше размеров областей, в которых происходит модуляция КЛ при спорадических явлениях. В связи с этим можно предположить, что нестационарные процессы происходят в волокнистых структурах ММП. Напряженность магнитного поля в этих структурах (см. поведение параметра β) за счет временных вариаций может уменьшаться более чем на порядок, а увеличиваться примерно в два раза. Значения параметра α варьируют от ~ 0.15 до ~ 0.25 .

Из сравнения графиков $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$ с графиком модуля ММП $|B|$ (см. рис. 1) в период экстремальных событий в октябре–ноябре 2003 г. следует, что 29 октября Земля попала в область повышенной напряженности ММП, что вызвало гигантский форбуш-эффект. Об этом свидетельствуют и повышенные значения амплитуд двунаправленной анизотропии A_2 , являющиеся признаком прохождения КВМ с соответствующей петлеобразной структурой ММП.

Во время события 20 ноября, когда в межпланетном пространстве наблюдалось возрастание модуля ММП почти до 60 нТл, эти параметры практически не отреагировали на такое повышение. В рамках используемой концепции данное явление может иметь место по двум причинам. Во-первых, эффекты потери энергии высокоэнергичными частицами, 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 при этом направлена с юга на север, эффекта в КЛ высоких энергий наблюдаться не будет. Во-вторых, эффекта понижения не будет и в том случае, если не сформируется петлеобразная структура ММП, являющаяся магнитной ловушкой. Тогда эффект повышения амплитуды второй гармоники будет отсутствовать, что и наблюдается в данном событии.

Как следует из рис. 1, в отдельные моменты исследуемого периода имеет место сильная анизотропия КЛ с амплитудами от 20 до 80 % для первой гармо-

ники A_1 и от 15 до 35 % для второй гармоники в питч-угловом распределении частиц A_2 .

Максимальные возрастания первой гармоники A_1 наблюдались в начале 29 октября (~70 %), в первой половине дня 1 ноября, в середине 3 и 17 ноября (~80 %), в середине 20 ноября (~65 %). Максимальные амплитуды двунаправленной анизотропии A_2 наблюдались в конце 29 октября (~35 %) и в начале 31 октября (~26 %).

В течение каждого из рассматриваемых форбуш-понижений рассчитан показатель жесткостного спектра вариаций γ при условии, что этот спектр можно описать степенной функцией жесткости частиц. Среднее значение показателя γ в минимуме форбуш-понижений составило -0.9 и -1.1 соответственно для октября и ноября. На стадии восстановления интенсивности КЛ в первом случае γ остается на одном уровне, а во втором просматривается ужесточение спектра (значение γ достигает -0.87).

2 и 29 октября (12 UT, в момент форбуш-понижения) доминировала первая гармоника, в эти моменты времени интенсивность КЛ была понижена на ~12 % из направления $\psi \sim 100^\circ$, $\lambda \sim -20^\circ$; 95 % из направления $\psi \sim 50^\circ$, $\lambda \sim 5^\circ$, соответственно. 22, 29 октября (22 UT) и 31 октября доминировала вторая гармоника, 29 октября (22 UT) поток интенсивности КЛ был повышен на 15 % с фазой $\psi \sim 320^\circ$, $\lambda \sim -35^\circ$ и на 10 % ($\psi \sim 140^\circ$, $\lambda \sim 30^\circ$). В ноябре второго числа в 01 UT доминировала вторая гармоника, в остальные моменты – первая гармоника. Во время магнитной бури ($D_{st} \sim -472$ нТл) 20 ноября (20 UT) доминировала первая гармоника, наблюдалось понижение интенсивности КЛ на ~34 % из направления $\psi \sim 30^\circ$, $\lambda \sim 10^\circ$.

Несмотря на то, что в обоих событиях наблюдается большое значение D_{st} -индекса (~ -400 нТл), динамика радиуса токового кольца различна. С 29 по 31 октября радиус токового кольца был постоянным и составил ~5 радиусов Земли, с 20 по 21 ноября наблюдается уменьшение радиуса с ~9 до ~3, а именно, 20 ноября в 14:00 UT и 18:00 UT – ~9 радиусов Земли, в 23:00 UT – ~5 радиусов Земли, 20 ноября в 24:00 UT и 21 ноября в 20:00 UT – ~3 радиуса Земли.

В разделе 3.1.3 анализируется форбуш-понижение в ноябре 2004 г. Для анализа использовались данные наблюдений интенсивности протонов, полученные на спутнике GOES-10 и данные 38 нейтронных мониторов.

Временные профили изменений ЖГО при $R_c = 4$ ГВ соответствуют изменениям D_{st} -индекса. При сравнении видно, что максимальные понижения пороговых жесткостей в периоды магнитных бурь наблюдались одновременно с минимальными значениями D_{st} -индекса.

Показано, что используемое выражение для жесткостного спектра КЛ удовлетворяет данным наблюдений временных профилей интенсивности частиц различных жесткостей.

В отдельные моменты исследуемого периода наблюдается сильная анизотропия КЛ с амплитудами от 11 до 60 % для первой гармоники A_1 и от 5 до 12 % для второй гармоники в питч-угловом распределении частиц A_2 .

Показатель спектра вариаций γ в период главной фазы составил ~ -1.4 , т. е. спектр вариаций мягкий.

При сравнении поведения параметра β с поведением скорости СВ обращает на себя внимание то обстоятельство, что изменение скорости СВ происходит, как правило, в соответствии с вариациями параметра β .

В разделе 3.1.4 анализируются вариации функции распределения и пороговых жесткостей геомагнитного обрезания КЛ в августе 2005 г. Для анализа использовались данные 44 станций нейтронных мониторов, исправленные на давление и усредненные за часовые интервалы. Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 2 апреля 2005 г.

Максимальная амплитуда модуляции для частиц с $R = 4$ ГВ наблюдалась 24 августа и составляла $\sim -25\%$, а для частиц с $R=10$ ГВ – 25 августа ($\sim -10\%$). Показатель спектра вариаций γ при жесткостях выше $\sim 3-4$ ГВ 24 августа в 12:00–13:00 UT составлял ~ -1.4 , а в последующие часы $\sim -1.1 \div -1.2$. Амплитуды анизотропии для частиц с $R=4$ ГВ, наблюдаемые в период максимальной модуляции 24 августа, составляли $A_1 \sim 45\%$, $A_2 \sim 4-5\%$. Максимальная амплитуда первой сферической гармоники для частиц с $R=4$ ГВ $A_1 \sim 70\%$ наблюдалась 25 августа в 22:00 UT.

Во время форбуш-понижения 24 августа в 16:00, 17:00 UT, и 25 августа в 22:00 UT доминировала первая гармоника. Интенсивность КЛ была понижена соответственно на ~ 30 , ~ 40 и $\sim 50\%$ из направления $\psi \sim 270^\circ$, $\lambda \sim 10^\circ$ (относительно линии Земля–Солнце). 24 августа в 24:00 UT и 26 августа в 16:00 UT заметен вклад двунаправленной анизотропии с повышенной интенсивностью КЛ из направления, перпендикулярного ММП. Двунаправленная анизотропия КЛ с жесткостью $R=4$ ГВ заметна также 31 августа в 10:00 UT. В 19:00 и в 21:00 UT 31 августа доминирует первая гармоника анизотропии КЛ, причем, если пониженная интенсивность КЛ с жесткостью $R=4$ ГВ в 19:00 UT наблюдалась в направлении $\psi \sim 80^\circ$, $\lambda \sim -10^\circ$, то через два часа (в 21:00 UT) пониженная интенсивность КЛ с жесткостью $R=4$ ГВ наблюдалась в противоположном направлении.

В августе 2005 г. имели место две магнитные бури различной мощности – 24–25 августа ($D_{st} \sim -216$ нТл, $|B| \sim 45$ нТл, $B_z \sim -40$ нТл) и 31 августа ($D_{st} \sim -130$ нТл, $|B| \sim 17.5$ нТл, $B_z \sim -17$ нТл). Временной ход изменений ЖГО для станции с $R_c=3.66$ ГВ в период 24–31 августа хорошо коррелирует с D_{st} -индексом. Коэффициент корреляции между ΔR_c и D_{st} -индексом составляет ~ 0.83 . Максимальные значения понижения ЖГО на станции Иркутск по времени совпадают с максимальными понижениями геомагнитного поля (24 августа в 12:00–13:00 UT, $\Delta R_c = -1.25-1.30$ ГВ, $D_{st} \sim -200$ нТл; 31 августа в 18:00 UT, $\Delta R_c = -0.7$ ГВ, $D_{st} \sim -130$ нТл).

24 августа в 10:00 UT радиус токового кольца был ~ 3 радиусов Земли, в 11:00 UT он составил ~ 5 радиусов Земли, в 12:00 – ~ 9 радиусов Земли, а в 15:00, 18:00 и 21:00 UT – ~ 5 радиусов Земли. 31 августа к концу суток изменения ЖГО на низкоширотных станциях КЛ были больше, чем на высоких и средних широтах. В этот период радиус токового кольца уменьшался от ~ 5 до ~ 3 радиусов Земли.

Раздел 3.2 посвящен анализу наземных возрастных интенсивности КЛ (GLE).

В разделе 3.2.1 исследовано GLE, обусловленное серией мощных протонных событий на Солнце в августе–октябре 1989 г. Для анализа использовались данные 42 станций нейтронных мониторов и данные наблюдений интенсивности частиц, полученные на спутнике GOES-7.

Событие характеризуется сложностью временных профилей интегральной интенсивности КЛ и различием времен начала возрастания на различных станциях, что свидетельствует о значительной анизотропии в угловом распределении частиц.

Судя по поведению параметра R_0 , который изменяется в пределах от ~ 0.5 до ~ 20 ГВ, размер областей с нестационарными электромагнитными полями на орбите Земли составляет $\sim 10^{10} - 10^{12}$ см. Напряженность магнитного поля в этих областях (поведение параметра β) за счет временных вариаций может уменьшаться почти до нулевых значений, а увеличиваться примерно в шесть раз. Значения параметра α варьирует от ~ 0 до ~ 0.8 , а $\Delta\epsilon_{pt}$ – от ~ 0 до ~ 0.3 ГэВ. Максимальное значение параметра $R_0 \sim 20$ ГВ наблюдалось 29 сентября 1989 г. в 12.00–13.00 UT, возрастания интенсивности зарегистрированы даже на экваториальных станциях.

В разделе 3.2.2 исследовано GLE, наблюдавшееся 15 июня 1991 г. Для анализа использовались данные 44 нейтронных мониторов и космического аппарата GOES-7. Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 3 марта 1991 г.

Наблюдаемые временные профили вариаций интенсивности КЛ на различных станциях КЛ мировой сети существенно отличаются друг от друга. Так, на высокоширотных станциях и ряде среднеширотных (с ЖГО менее $\sim 2-3$ ГВ) наблюдалось возрастание интенсивности КЛ на 5–30 % в 10:00 UT 15 июня 1991 г. Максимальное значение повышенной интенсивности КЛ зарегистрировано на антарктической станции Южный Полюс и составило 30 %. На станциях с более высокими ЖГО в этот же период наблюдается спад интенсивности. Следует отметить, что повышение интенсивности КЛ произошло на фазе восстановления фобуш-понижения, начавшегося после геомагнитной бури 13 июня 1991 г.

Поведение анизотропии относительно стабильно. Для частиц с жесткостью $R=4$ ГВ в 09:00–12:00 UT 15 июня 1991 г. наблюдалась вторая гармоника, в момент времени 10:00 UT (во время вспышки) интенсивность КЛ повышена на ~ 30 % из направления $\psi \sim 150^\circ$, $\lambda \sim -60^\circ$ и на ~ 25 % – из направления $\psi \sim 300^\circ$, $\lambda \sim 40^\circ$. В 13:00 (через два часа после вспышки) наблюдалась первая гармоника, интенсивность КЛ была понижена на ~ 85 % в направлении $\psi \sim 95^\circ$, $\lambda \sim 0^\circ$. Для частиц с жесткостью $R=10$ ГВ вариации углового распределения идентичны вариациям интенсивности частиц с жесткостью $R=4$ ГВ, за исключением момента времени 10:00 UT (во время максимального возрастания КЛ), когда для частиц жесткостью $R=10$ ГВ доминирует первая сферическая гармоника, в то время как для частиц жесткостью $R=4$ ГВ ярко выражена двунаправленная анизотропия.

Анализируя поведение параметров жесткостного спектра КЛ, можно видеть, что изменение электромагнитных характеристик гелиосферы начинается до события. В частности, во второй половине 14 июня начинается возрастание параметра α (от ~ 0.18 до ~ 0.20) и понижение параметра β (от ~ 0.20 до ~ 0.17).

Возрастание интенсивности частиц (2 ГВ) обусловлено размером структур ММП, в которых происходило ускорение частиц под действием этих полей (возрастание параметра R_0 с ~ 0.3 до ~ 1.8 ГВ).

Сопоставляя дифференциальные жесткостные спектры КЛ в отдельные моменты времени 15 июня 1991 г. с фоновым спектром КЛ (3 марта 1991 г.) (рис. 2) можно заключить, что используемый вид спектра хорошо описывает наблюдаемую зависимость интенсивности КЛ от их жесткости на всем анализируемом временном интервале. При детальном анализе рис. 2 можно видеть, что в 08:00 UT 15.06.1991 г. при жесткостях выше ~ 0.8 ГВ наблюдается продолжение форбуш-понижения, которое началось 13.06.1991 г. Повышение интенсивности протонов с жесткостями до $\sim 2\text{--}3$ ГВ началось в 09:00 UT, а в 10:00 UT повышенная интенсивность частиц видна до жесткостей $\sim 5\text{--}6$ ГВ. В это же время в области более высоких энергий интенсивность частиц понижена относительно спокойного уровня. В последующие часы ситуация аналогична моментам, предшествующим началу GLE.

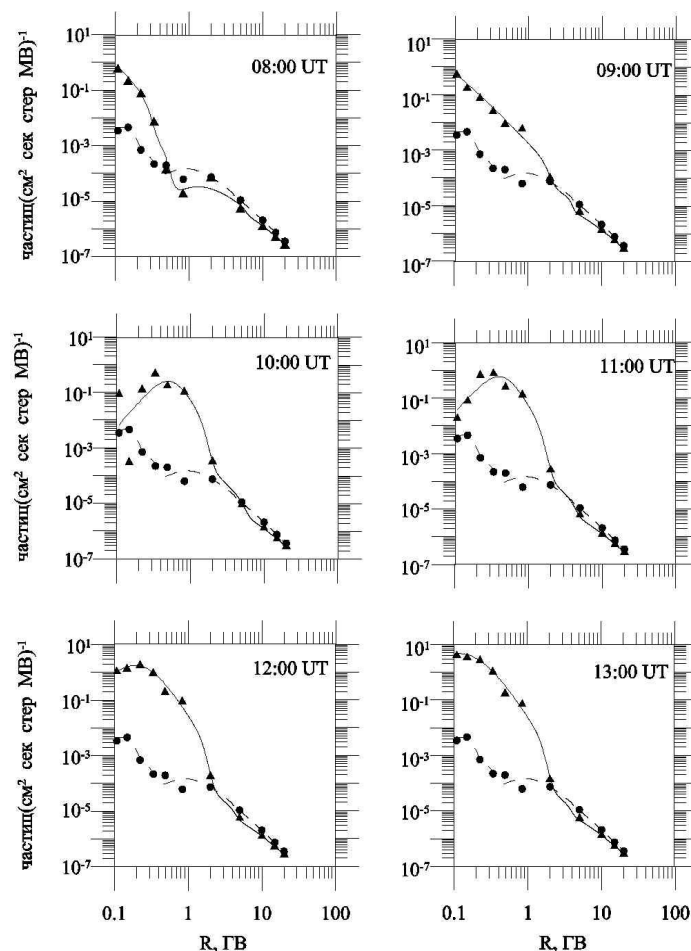


Рис. 2. Дифференциальные жесткостные спектры КЛ в отдельные моменты времени GLE 15.06.1991 г. Сплошная кривая – результаты расчетов модельного спектра в указанные моменты времени, треугольники – данные наблюдений; штриховая кривая – расчетный фоновый спектр, точки – данные наблюдений.

Тот факт, что возрастание на орбите Земли потоков низкоэнергичных протонов ($\sim 0.8 < R < \sim 2-3$ ГВ) произошло раньше, чем для более энергичных частиц, дает дополнительную информацию для исследования механизмов ускорения СКЛ и их распространения в межпланетном пространстве.

В разделе 3.2.3 анализируется GLE, зарегистрированное 20 января 2005 г. Для анализа использовались усредненные за часовые временные интервалы данные наблюдений интенсивности протонов, полученные на спутнике GOES-11, и данные 43 станций нейтронных мониторов.

Первоначальное возрастание интенсивности частиц низких энергий обусловлено генерацией поляризационных электрических полей (возрастание параметра α), которое началось в начале 15 января. Затем, наряду с ускорением поляризационными электрическими полями, происходит ускорение КЛ за счет бетатронного механизма вследствие генерации магнитных полей гелиосферы (возрастание параметра β в начале 16 января). Генерация магнитных полей приводит к возрастанию напряженности ММП, что обуславливает понижение интенсивности высокоэнергичных частиц (возрастание параметров $\Delta\epsilon_1$ и $\Delta\epsilon_2$ в середине 17 января). Понижение интенсивности за счет последних двух параметров наблюдается и для частиц малых энергий, но для частиц с жесткостью $R < R_0$ эффекты ускорения в вихревых и поляризационных электрических полях доминируют над эффектами потери энергии в индуцированном электрическом поле, в связи с чем их интенсивность хотя и понижается, но остается выше фоновой.

Анализируя поведение параметров жесткостного спектра в событии 20 января 2005 г., можно видеть, что значения параметров α и β мало отличаются от их значений в периоды предшествующих СПС. Это означает, что поляризационные и вихревые электрические поля в гелиосфере являются типичными, а возрастание интенсивности высокоэнергичных частиц (5 ГВ) обусловлено размером структур ММП, в которых происходило ускорение частиц под действием этих полей (возрастание параметра R_0).

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.

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. указывают на относительно стабильное поведение анизотропии КЛ в период ее максимальных значений. Так, на начальной фазе GLE в 06:55 UT увеличенный поток приходил из направления $\sim 100^\circ$, $\sim -75^\circ$ (5100 %), в 07:00 UT – из направления $\sim 60^\circ$, $\sim -65^\circ$ (7500 %), в 07:05 и 07:15 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 $\sim 120^\circ$, $\sim -170^\circ$, $\sim 0 \div -30^\circ$, совпадающих с направлением ММП.

Вариации интенсивности энергичных частиц в рассматриваемом диапазоне обусловлены изменением энергии ГКЛ под действием электромагнитных по-

лей, 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 краткие моменты времени (например, в 07:00 UT 20.01.2005 г., о чем можно судить по расхождениям между модельным и наблюдаемым спектрами в области малых энергий).

В разделе 3.2.4 анализируются характеристики спектра и анизотропии КЛ в период GLE в декабре 2006 г. Для анализа использовались усредненные за часовые интервалы времени и откорректированные на геометрический фактор данные наблюдений интенсивности протонов со спутника GOES-11 и данные 32 станций нейтронных мониторов.

При сравнении временных вариаций параметров жесткого спектра КЛ с временными профилями интенсивности низкоэнергичных протонов можно сделать вывод о том, что возрастание интенсивности КЛ низких энергий обусловлено ускорением частиц межпланетной среды поляризационными и вихревыми электрическими полями (возрастание параметров α и β), которое началось 5 декабря в момент пересечения Землей токового слоя.

Используемый вид спектра хорошо описывает наблюдаемую зависимость интенсивности КЛ от их жесткости на всем анализируемом временном интервале за исключением моментов 04:00 и 05:00 UT 13 декабря, т. е. на начальной стадии GLE.

В момент регистрации GLE наблюдается значительная анизотропия. Распределения частиц с жесткостью $R=4$ ГВ по направлениям прихода указывает на то, что максимальные потоки КЛ наблюдались в 04:00 UT из направления 170° , -20° ($\sim 150\%$), т. е. практически из антисолнечного направления.

Раздел 3.3 посвящен исследованию природы всплесков интенсивности низкоэнергичных КЛ в марте 1986 г. Использовались данные наблюдений интенсивности частиц со спутника GOES-7 и данные 42 нейтронных мониторов.

Анализируя поведение параметров жесткого спектра КЛ, можно заключить, что наблюдаемые всплески интенсивности частиц происходят в основном вследствие появления в гелиосфере более крупномасштабных структур ММП с переменными электромагнитными полями по сравнению с фоновыми структурами в солнечной короне и гелиосфере, которые, по-видимому, являются следствием перманентных микровзрывных процессов на малых пространственных масштабах.

Раздел 3.4 на примере изучения модуляции КЛ в апреле 2008 г. и октябре 2009 г. дает интерпретацию особенностей поведения ГКЛ в минимуме 24 солнечного цикла [5], который характеризуется рекордным возрастанием ГКЛ в 2008–2009 гг.

Использовались данные наблюдений интенсивности КЛ со спутника GOES-11 и данные 44 нейтронных мониторов. Амплитуды модуляции отсчитывались от спокойного уровня в апреле 2008 г.

Результаты расчетов хорошо соответствуют данным наблюдений, полученным по мировой сети станций КЛ, а изменения энергии КЛ в электромагнитных полях гелиосферы в апреле 2008 г. и октябре 2009 г. не противоречат значениям «модуляционного параметра» для периодов минимума солнечной

активности, полученным на основе модели «силового поля». Результаты расчетов жесткостных спектров протонов показаны на рис. 3, где штриховая кривая – жесткостной спектр протонов в апреле 2008 г., сплошная – в октябре 2009 г., треугольники и точки – данные наблюдений.

Изменения энергии КЛ в электромагнитных полях гелиосферы в апреле 2008 г. в среднем составили ~ 0.50 ГВ, а в октябре 2009 г. – ~ 0.37 ГВ. Эти величины близки значениям модуляционного параметра для периодов минимума солнечной активности.

Определяющим фактором увеличения потоков ГКЛ на орбите Земли в октябре 2009 г. по сравнению с апрелем 2008 г. является уменьшение потерь энергии при движении частиц в регулярных электромагнитных полях гелиосферы.

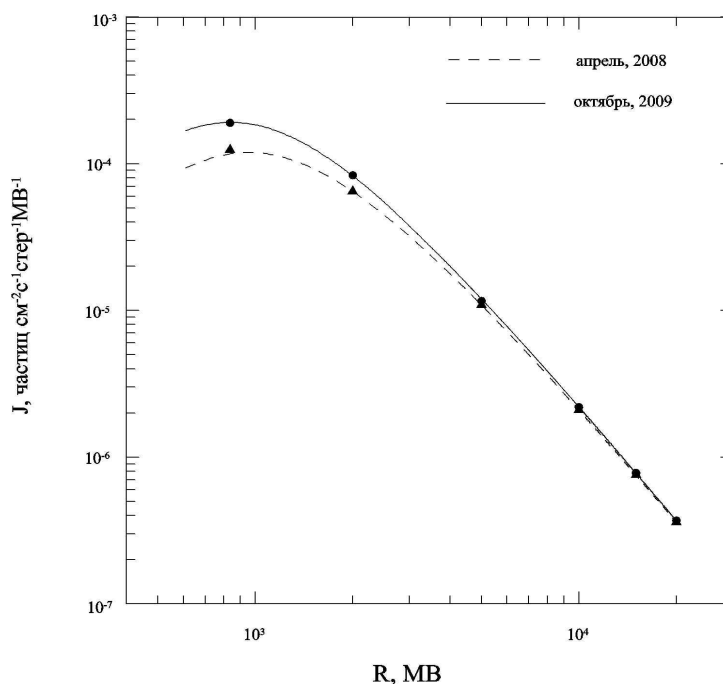


Рис. 3. Дифференциальные спектры протонов на орбите Земли в апреле 2008 и октябре 2009 г. (пунктирная кривая – жесткостной спектр протонов в апреле 2008 г., сплошная – в октябре 2009, треугольники и точки – данные наблюдений).

Раздел 3.5 показывает соответствие результатов расчета экспериментальным данным. Для анализа использовались данные 44 станций нейтронных мониторов за 2004–2005 гг. и спутника GOES-11.

При анализе наиболее мощных солнечных протонных событий и временного хода интенсивности КЛ за исследуемый период показано, что исследуемое выражение для спектра весьма удовлетворительно описывает вариации интенсивности КЛ в диапазоне энергий от единиц МэВ до десятков ГэВ.

Получено хорошее соответствие наблюдаемых значений интенсивности расчетным для отдельных СПС в 2004 и 2005 г. (коэффициенты корреляции – от 0.97 до 0.999). Выделяется событие 15–27.01.2005 г., в котором в отличие от других приведенных событий наблюдается разброс точек относительно прямой линии, что объясняется наличием источников частиц солнечного происхождения.

Наблюдается высокая корреляция между усредненными за сутки наблюдаемыми и расчетными значениями интенсивности КЛ за период 2004–2005 гг. (коэффициент корреляции ~ 0.989).

В **четвертой главе** описывается влияние космических факторов на количество отказов спутниковой электроники.

Одним из определяющих факторов, влияющих на радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве, могут быть возрастания интенсивности КЛ при СПС. В этом случае для качественного учета радиационной обстановки на спутниковых орбитах необходимы не только надежное количественное определение параметров энергетического спектра КЛ за весь период возрастания, но и определение вариаций планетарной системы ЖГО. Особенно это касается тех случаев, когда СПС наблюдаются в периоды геомагнитных бурь, во время которых изменяются условия доступа заряженных частиц на орбиты спутников и происходит высыпание частиц из радиационных поясов. За счет увеличения плотности верхних слоев атмосферы возможно изменение орбиты спутников.

Исследовано влияние космических факторов, характеризующихся переменными во времени потоками высокоэнергичных частиц, на количество отказов электроники высокоорбитальных спутников за период август–октябрь 1989 г. (рис. 4), когда количество этих отказов было экстремальным.

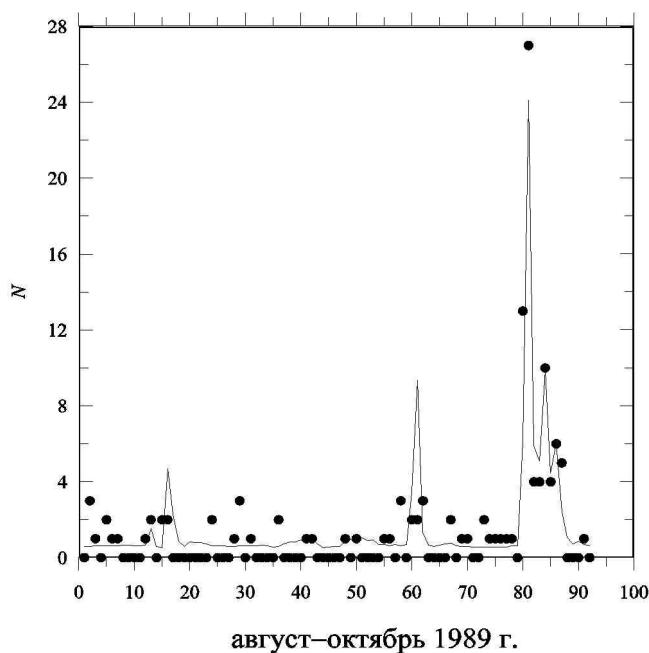


Рис. 4. Количество отказов спутниковой электроники за период август–октябрь 1989 г. Сплошная кривая – среднее за сутки расчетное количество отказов, точки – наблюдаемое среднесуточное количество отказов.

Коэффициент корреляции между расчетным и наблюдаемым количествами отказов составляет ~ 0.9 .

Наибольшее количество отказов отмечалось с 82 (19 октября) по 89 (26 октября) день 1989 г. (73 отказа на 75 спутниках) и было обусловлено суперпозицией двух факторов: возрастанием интенсивности КЛ за пределами магнитосферы и одновременным понижением ЖГО вследствие мощных геомагнитных возмущений.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные при работе над диссертацией.

1. Используемая в работе модель модуляции КЛ адекватно объясняет широкий спектр явлений при КВМ: вариации жесткостного спектра и анизотропии КЛ, GLE, форбуш-понижения и т. д.

2. Используемый вид спектра удовлетворительно описывает временные профили интенсивности КЛ и их жесткостные спектры в энергетическом диапазоне от ~ 15 МэВ до десятков ГэВ. Наблюдается высокая степень соответствия анализируемых временных рядов (коэффициент корреляции составил ~ 0.989).

3. На основе сравнения временных вариаций параметров жесткостного спектра КЛ с временными профилями интенсивности КЛ можно сделать вывод, что накануне СПС происходят изменения электромагнитных характеристик гелиосферы. В частности, можно видеть, что за несколько часов или десятков часов перед СПС 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 ММП (параметр $\Delta\epsilon_1$).

Данное обстоятельство позволяет надеяться на возможность прогнозирования СПС при мониторинге электромагнитных характеристик гелиосферы по эффектам в КЛ.

4. Обнаружено возрастание на орбите Земли потоков низкоэнергичных протонов ($\sim 0.8 < R < \sim 2-3$ ГВ), которое происходило раньше, чем для более энергичных частиц, что может являться дополнительной информацией при изучении механизмов ускорения и распространения СКЛ в межпланетном пространстве.

5. Определяющим фактором увеличения потоков ГКЛ на орбите Земли в октябре 2009 г. по сравнению с апрелем 2008 г. является уменьшение потерь энергии при движении частиц в регулярных электромагнитных полях гелиосферы.

6. Показано, что спектр вариаций КЛ не описывается степенной функцией жесткости в широком диапазоне энергий. Спектр вариаций КЛ является степенным только при жесткостях частиц выше $\sim 10-15$ ГВ. Из пяти проанализированных форбуш-понижений в двух случаях (март 1991 г. и октябрь 2003 г.) спектр вариаций КЛ является жестким ($\gamma \sim -0.9$), а в трех случаях (ноябрь 2003 и ноябрь 2004 г., август 2005 г.) – мягким ($\gamma \sim -1.1 \div -1.6$).

7. В рамках простейших моделей кольцевого тока в магнитосфере Земли по поведению зависимости изменений пороговых ЖГО (ΔR_c) от пороговых жесткостей R_c можно судить о его радиусе и силе.

8. Полученные результаты по изменениям пороговых ЖГО (ΔR_c) от пороговых жесткостей R_c в периоды геомагнитных возмущений могут быть использованы для тестирования различных моделей магнитосферных токовых систем и их динамики.

9. Максимальное количество отказов спутниковой электроники, наблюдавшееся с 19 по 26 октября 1989 г., было обусловлено суперпозицией двух факторов: возрастанием интенсивности КЛ за пределами магнитосферы и одновременным понижением ЖГО вследствие мощных геомагнитных возмущений.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Dvornikov, V.M. Variations in rigidity spectrum and anisotropy of cosmic rays during sporadic phenomena in the heliosphere in October–November 2003 / V.M. Dvornikov, V.E. Sdobnov, M.V. Yudina (M.V. Kravtsova) // *Cosmic Research*. – 2004. – V. 42. – N 6. – P. 619–625.
2. Ермолаев, Ю.И. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. / Ю.И. Ермолаев, Л.М. Зеленый, Г.Н. Застенкер, А.А. Петрукович, М.Ю. Ермолаев, Н.С. Николаева, М.И. Панасюк, С.Н. Кузнецов, И.Н. Мягкова, Е.А. Муравьева, Б.Ю. Юшков, И.С. Веселовский, А.В. Дмитриев, А.Н. Жуков, О.С. Яковчук, В.Д. Кузнецов, И.М. Черток, В.Н. Ишков, А.В. Белов, Е.А. Ерошенко, В.Г. Янке, С.П. Гайдаш, Х.Д. Канониди, С.В. Кузин, И.А. Житник, А.П. Игнатъев, В.А. Слемзин, Н.К. Суходрев, С.А. Шестов, М.В. Еселевич, В.Г. Еселевич, Г.В. Руденко, В.М. Дворников, В.Е. Сдобнов, М.В. Кравцова, В.М. Богод, В.С. Котельников, Л.А. Першаков, М.И. Белоглазов, В.И. Власов, И.В. Чашей, Н.Г. Клейменова, О.В. Козырева, В.И. Козлов, В.А. Пархомов, Ю.А. Кугаенко, Р.З. Хисамов, В.Л. Янчуковский, К. Кудела // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2005. – Т. 45. – № 6. – С. 723–763.
3. Дворников, В.М. Вариации планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания космических лучей в октябре–ноябре 2003 г. / В.М. Дворников, В.Е. Сдобнов, М.В. Юдина (М.В. Кравцова) и др. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2005. – Т. 45, – № 1. – С. 58–63.
4. Дворников, В.М. Вариации жесткостного спектра и анизотропии космических лучей в октябре–ноябре 2003 г. / В.М. Дворников, В.Е. Сдобнов, М.В. Юдина (М.В. Кравцова) // *Известия РАН. Серия физ.* – 2005. – Т. 69. – № 6. – С. 825–828.
5. Дворников, В.М. Модуляция космических лучей регулярными электромагнитными полями гелиосферы в периоды солнечных протонных событий / В.М. Дворников, В.Е. Сдобнов, А.А. Луковникова, М.В. Юдина (М.В. Кравцова) // *Известия РАН. Сер. физ.* – 2005. – Т. 69. – № 6. – С. 821–824.
6. Дворников, В.М. Корональные выбросы массы и эффекты в космических лучах / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // *Известия РАН. Сер. физ.* – 2006. – Т. 70. – № 10. – С. 1504–1507.
7. Дворников, В.М. Вариации жесткостного спектра космических лучей в период событий января 2005 г. / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, А.А. Луковникова, В.Е. Сдобнов // *Известия РАН. Сер. физ.* – 2007. – Т. 71. – № 7. – С. 975–977.
8. Дворников, В.М. О возможности прогноза солнечных протонных событий / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, А.А. Луковникова, В.Е. Сдобнов // *Известия РАН. Сер. физ.* – 2007. – Т. 71. – № 7. – С. 978–980.
9. Dvornikov, V.M. The method for predicting solar proton events / V.M. Dvornikov, M.V. Kravtsova, A.A. Lukovnikova, V.E. Sdobnov // *Adv. Space Res.* – 2009. – V. 43. – N 4. – P. 735–738.
10. Дворников, В.М. Первичные и вторичные эффекты в вариациях космических лучей при солнечных протонных событиях / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, А.А. Луковникова, В.Е. Сдобнов // *Известия РАН. Сер. физ.* – 2009. – Т. 73. – № 3. – С. 342–344.
11. Дворников, В.М. Изменения жесткости геомагнитного обрезания в Иркутске / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // *Известия РАН. Сер. физ.* – 2009. – Т. 73. – № 3. – С. 388–392.
12. Kravtsova, M.V. Effects in cosmic rays in March 1991 / M.V. Kravtsova, V.E. Sdobnov // *Geomagnetism and Aeronom.* – 2011. – V. 51. – N. 7. – P. 958–962.
13. Dvornikov, V.M. A unified formation mechanism for the cosmic-ray rigidity in the energy range from a few MeV to several tens of GeV for different phenomena in the heliosphere / V.M. Dvornikov, V.E. Sdobnov, M.V. Yudina (M.V. Kravtsova) // *The 27th General Assembly of the European Geophysical Society (EGS), Nice, France, 21–26 April, 2002. Geophysical Research Abstracts*. – 2002. – V. 4. – GS02-A-01108 (CD-ROM).
14. Dvornikov, V.M. On the possibility of monitoring and forecasting the «space weather» from variations of the cosmic-ray rigidity spectrum / V.M. Dvornikov, V.E. Sdobnov, M.V. Yudina (M.V.

Kravtsova) // The 27th General Assembly of the European Geophysical Society (EGS), Nice, France, 21–26 April, 2002. Geophysical Research Abstracts. – 2002. – V. 4. – EGS02-A-01106 (CD-ROM).

15. Дворников, В.М. Влияние вариаций интенсивности космических лучей на сбои в работе электроники высокоорбитальных спутников / В.М. Дворников, В.Е. Сдобнов, М.В. Юдина (М.В. Кравцова) и др. // Труды VI Конференции молодых ученых «Волновые процессы в проблеме космической погоды» БШФФ-2003. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2003. – С. 122–124.

16. Юдина, М.В. (Кравцова, М.В.) О природе всплесков интенсивности низкоэнергичных космических лучей / М.В. Юдина (М.В. Кравцова), В.М. Дворников, В.Е. Сдобнов // Труды VII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» БШФФ-2004. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2004. – С. 178–180.

17. Дворников, В.М. Вариации анизотропии космических лучей при спорадических явлениях в гелиосфере в октябре–ноябре 2003 г. / В.М. Дворников, В.Е. Сдобнов, М.В. Юдина (М.В. Кравцова) // Труды 28^{ой} Всерос. конф. по космич. лучам. Москва, МИФИ, 07–11 июня 2004 г.: тексты докладов. – М.: 2004. С. 2214. (CD-ROM).

18. Дворников, В.М. Мониторинг электромагнитных и радиационных условий в гелиосфере по эффектам в космических лучах / В.М. Дворников, В.Е. Сдобнов, М.В. Юдина (М.В. Кравцова) // Солнечно-земная физика. – 2005. – Т. 121. – № 8. – С. 49–51.

19. Dvornikov, V.M. Variations of parameters of rigidity spectrum of cosmic rays during events of January, 2005 / V.M. Dvornikov, M.V. Kravtsova, A.A. Lukovnikova, V.E. Sdobnov, A.V. Belov, E.A. Eroshenko, V.G. Yanke, O.N. Kryakunova // Proc. 30th ICRC. Merida, Mexico. – 2007. – V. 1. – P. 155–158.

20. Dvornikov, V.M. Forecast of the Solar Proton Events according to the Rigidity Spectrum Variations of Cosmic Rays / V.M. Dvornikov, M.V. Kravtsova, A.A. Lukovnikova, V.E. Sdobnov, O.N. Kryakunova // Proc. 30th ICRC. Merida, Mexico. – 2007. – V. 1. – P. 127–130.

21. Дворников В.М., Ускорение космических лучей в гелиосфере / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // Труды VIII Конференции молодых ученых «Астрофизика и физика околоземного космического пространства» БШФФ-2005. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2005. С. 167–169.

22. Дворников, В.М. Вариации параметров межпланетной среды и изменения жесткостей геомагнитного обрезания космических лучей в ноябре 2004 г. / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, А.А. Луковникова, В.Е. Сдобнов // Труды VIII Конференции молодых ученых «Астрофизика и физика околоземного космического пространства» БШФФ-2005. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2005. – С. 207–210.

23. Дворников, В.М. Изменения энергии космических лучей при спорадических явлениях в гелиосфере / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // Труды Всерос. конф. «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности». – Троицк, 2005. – С. 97–102.

24. Дворников, В.М. Вариации жесткостного спектра и анизотропии космических лучей в период солнечно-протонного события 20 января 2005 / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, А.А. Луковникова, В.Е. Сдобнов // Труды XI Конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде» БШФФ-2006. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2006. – С. 207–210.

25. Dvornikov, V.M. Correlation between variations of cosmic ray spectrum and interplanetary medium parameters / V.M. Dvornikov, M.V. Kravtsova, V.E. Sdobnov // Proc. Solar-Extreme Events 2005: Fundamental Science and Applied Aspects. 2nd Intern. Symposium SEE-2005 (Nor-Amberd, Armenia, 26–30 September, 2005), 2006. – P. 176–179.

26. Дворников, В.М. Вариации жесткостного спектра и анизотропии космических лучей при корональных выбросах массы / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // Труды X Конференции молодых ученых «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы» БШФФ-2007. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2007. – С. 200–202.

27. Дворников, В.М. Прогноз солнечных протонных событий по вариациям жесткостного спектра космических лучей / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // Сб. трудов Всерос. конф. «Современные проблемы космической физики». – Якутск, 2008. – С. 127–130.
28. Дворников, В.М. Трансформации жесткостного спектра галактических космических лучей при солнечных протонных событиях / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // Труды 30^{ой} Всерос. конф. по космическим лучам (Санкт-Петербург, 2–7 июля 2008 г.). – 2008. – MOD_10.pdf (CD-ROM).
29. Дворников, В.М. Характеристики спектра и анизотропии космических лучей в период GLE в декабре 2006 г. / В.М. Дворников, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // Труды XI Конференции молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования» БШФФ-2009. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2009. – С. 259–263.
30. Кравцова, М.В. Вариации пороговых жесткостей геомагнитного обрезания космических лучей в августе 2005 г. / М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // Сб. тезисов, материалы Семнадцатой Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых (ВНКСФ–17, Екатеринбург): материалы конференции, тезисы докладов. – Екатеринбург: Изд-во АСФ России, 2011. – Т. 1. – С. 360.
31. Кравцова, М.В. Вариации функции распределения космических лучей в августе 2005 г. / М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // Сб. тезисов, материалы Семнадцатой Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых (ВНКСФ–17, Екатеринбург): материалы конференции, тезисы докладов. – Екатеринбург: Изд-во АСФ России, 2011. – Т. 1. – С. 358.
32. Kravtsova, M.V. Modulation of cosmic rays during solar cycle 24 minimum / M.V. Kravtsova, V.E. Sdobnov // Proc. 32th ICRC, Beijing, China, 11–19 August 2011. – 2011. – V. 11. – P. 228–230.
33. Кравцова, М.В. Солнечное протонное событие 15 июня 1991 г. / М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов // Труды XII Конференции молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования» БШФФ-2011. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2011. – С. 77–80.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Топтыгин, И.Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях / И.Н. Топтыгин – М.: Наука, 1983. – 301 с.
2. Dvornikov, V.M. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy cosmic rays at the period of Forbush effect on the 12–25 Jule 1982 / V.M. Dvornikov, V.E. Sdobnov // IJGA. – 2002. – V. 3. – N 3. – P. 217–228.
3. Richardson, I.G. Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~ 1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta / I.G. Richardson, V.M. Dvornikov, V.E. Sdobnov, H.V. Cane // J. Geophys. Res. – 2000. – V. 105. – N A6. – P. 12579–12591.
4. Kravtsova, M.V. Modulation of cosmic rays during solar cycle 24 minimum / M.V. Kravtsova, V.E. Sdobnov // Proc. 32th ICRC, Beijing, China, 11–19 August 2011. – 2011. – V. 11. – P. 228–230.
5. Базилевская, Г.А. Особенности вариаций космических лучей в фазе минимума между 23 и 24 солнечными циклами / Г.А. Базилевская, М.Б. Крайнев, В.С. Махмутов и др. // Известия РАН. Сер. физ. – 2011. – Т. 75. – № 6. – С. 831–834.

Отпечатано в издательском отделе
ИСЗФ СО РАН
Заказ № 129 от 31 мая 2012 г.
Объем 23 с.
Тираж 120 экз.