

МУРАШОВ Алексей Михайлович

БЫСТРЫЕ ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ  
ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ОКРЕСТНОСТИ ЗЕМЛИ  
СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

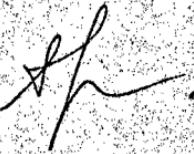
01.04.16 – Физика ядра и элементарных частиц

*Автореферат*

*диссертации на соискание ученой степени*

*кандидата физико-математических наук*

Автор:



Москва 1999 г.

Работа выполнена в Московском Государственном Инженерно-Физическом Институте (Техническом Университете).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Гальпер А.М.

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук, проф. Базилевская Г.А. (ФИАН)

Доктор физико-математических наук, проф. Сосновец Э.Н. (НИИЯФ МГУ)

Ведущая организация: Институт прикладной геофизики (ИПГ)

Защита состоится «20» сентября 1999 г. в 17:30 часов на заседании диссертационного совета К 053.03.05 в МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. 324-84-98, 323-92-51

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» августа 1999 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент

*А.Н. Гудков*

А.Н. Гудков

Подписано к печати 19.07.99

Заказ 698

Тираж 80

Типография МИФИ, Каширское шоссе, 31

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день экспериментальное и теоретическое исследование потоков высокозергичных заряженных частиц в окрестности Земли представляет собой значительный научный интерес. Особый научный интерес в области как фундаментальных, так и прикладных исследований играет экспериментальное исследование быстрых вариаций высокозергичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве. Эти исследования предоставляют дополнительную информацию о вспышечных процессах на Солнце, распространении солнечных космических лучей в межпланетном пространстве, процессах проникновения высокозергичных заряженных частиц вглубь магнитосферы Земли, формирования новых РП в околоземном космическом пространстве. Наряду с этим актуальной проблемой является возможность предсказания землетрясений с использованием научной аппаратуры на КА, на основе физического процесса – корреляции сильных землетрясений и высыпаний высокозергичных заряженных частиц из внутреннего РП Земли. Существующие на сегодняшний день модели расчета распространения заряженных частиц в магнитосфере Земли описывают некорректно движение частиц на атмосферной границе РП Земли, где градиенты геомагнитной индукции или плотности атмосферы достаточно велики даже на одном ларморовском обороте частицы.

Цель работы. Анализ результатов экспериментальных наблюдений пульсаций высокозергичных заряженных частиц полученных телескопом-спектрометром МАРИЯ-2 в околоземном космическом пространстве, разработка численной модели процессов распространения высокозергичных заряженных частиц (1-1000 MeV) на атмосферной границе РП Земли, учитывающей реальную конфигурацию геомагнитного поля, представленную рядом сферических функций, и взаимодействие частиц с остаточной атмосферой Земли, методики расчета временных профилей пульсаций высокозергичных заряженных частиц, формируемых при локальных возмущениях РП и использовании данной методики для восстановления физических характеристик (пространственные, энергетические и временные) локальных возмущений РП на основе сравнения экспериментально измеренных и рассчитанных в рамках численной модели временных профилей пульсаций частиц.

### Научная новизна работы.

1. Впервые выполнено сравнение результатов прямого измерения энергетических спектров протонов от мощной солнечной вспышки внутри магнитосферы Земли (ниже значения пороговой жесткости в стационарном случае) и в отсутствие геомагнитного обрезания. Показано совпадение спектров протонов от солнечной вспышки, измеренных спектрометром МАРИЯ-2 на борту ОК МИР, на КА GOES-7 и МЕТЕОР-3 30.10.91, что указывает на возможность прямого проникновения солнечных частиц вглубь магнитосферы Земли;

2. Впервые в эксперименте МАРИЯ-2 на борту ОК МИР зарегистрированы на атмосферной границе РП Земли квазипериодические пульсации потоков высокозэнергичных электронов, с периодами порядка одной миnutы;
3. Впервые разработана численная модель процессов распространения высокозэнергичных заряженных частиц (1–1000 МэВ) на атмосферной границе РП Земли, учитывающая реальную конфигурацию геомагнитного поля, представленного рядом сферических функций, и взаимодействие частиц с остаточной атмосферой Земли (динамические модели атмосферы Земли, ионизационные и тормозные потери энергии частиц, кулоновское рассеяние). На основе расчетов, выполненных в рамках этой модели
  - показано, что на атмосферной границе РП могут создаваться волны частиц с энергиями несколько десятков МэВ, многократно обходящие вокруг Земли вдоль дрейфовых оболочек и формирующие при измерениях на ИСЗ квазипериодические затухающие пульсации частиц;
  - разработана методика расчета временных профилей пульсаций высокозэнергичных заряженных частиц, формируемых при локальных возмущениях РП Земли;
4. впервые показано, что на основе сравнения экспериментально измеренных и рассчитанных в рамках предложенной модели временных профилей пульсаций частиц можно определять физические характеристики (пространственные, энергетические и временные) локальных возмущений РП, и, в частности, при возмущениях сейсмической природы можно восстановить координаты отдельных землетрясений.

Практическая ценность работы. Методические результаты (разработанная модель и методика моделирования пульсаций высокозэнергичных заряженных частиц в окрестности Земли), приведенные в Главах 3 и 4 являются универсальными и могут применяться для анализа данных других экспериментов. Экспериментальные результаты, приведенные в Главах 4 и 5, могут использоваться для построения моделей формирования и эволюции локальных возмущений РП Земли. Практическая ценность работы заключается в принципиальной возможности определения координат готовящегося землетрясения.

Вклад автора. Изложенные в работе результаты получены автором лично или в соавторстве при его участии.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на:

1. 5-й международной школе-семинаре "Автоматизация исследований в ядерной физике и астрофизике", Сочи, 1992;
2. Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам "Ленинские горы-95" (секция физики), г. Москва, 1995 г.,
3. 24<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, Roma, Italy, 1995.

4. Международной конференции по космическим лучам, Москва, 1996 г.;
5. 4<sup>th</sup> Russian Symposium "Mathematical Models of the Sun-Earth Environment", MSU, Moscow, 1996;
6. Workshop "Space Radiation Environment Modelling: New Phenomena and Approaches", Moscow, 1997;
7. 25<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, Durban, South Africa, 1997;
8. Научной сессии МИФИ, 1998 г.;
9. 25-ой Российской конференции по космическим лучам. Москва, 1998 г.
10. научной сессии МИФИ, 1999 г.;
11. 26<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, Salt Lake City, Utah, 1999;

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных научных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из пяти глав и заключения.

В главе 1 (Введение) дается обзор экспериментальных данных по наблюдению быстрых вариаций потоков заряженных частиц, методов расчета и анализа распространения частиц в окрестности Земли и демонстрируется актуальность и практическая ценность изучения именно быстрых пульсаций потоков высокoenергичных частиц. В следующих главах последовательно описывается:

Глава 2 – результаты экспериментальных измерений потоков высокoenергичных заряженных частиц в эксперименте МАРИЯ-2 в околоземном космическом пространстве.

Глава 3 – численная модель процессов распространения высокoenергичных заряженных частиц на атмосферной границе РП Земли, учитывающая реальную конфигурацию геомагнитного поля, представленную рядом сферических функций, и взаимодействие частиц с остаточной атмосферой Земли.

Глава 4 – результаты расчета движения частиц, проведенные в рамках модели, изложенной в Главе 3, методика расчета пульсаций частиц на атмосферной границе РП Земли.

Глава 5 – результаты анализа процессов формирования квазипериодических пульсаций потоков частиц, зарегистрированных в экспериментах МАРИЯ-2 на борту ОК МИР и на ИСЗ CRRES.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Общий объем составляет 121 страница, включая 45 рисунков (занимающих 27 страницы), 9 таблиц и список литературных ссылок из 68 наименований.

На защиту выносятся.

1. результаты измерения энергетического спектра протонов от солнечной вспышки 30 октября 1991 г., с помощью телескопа-спектрометра МАРИЯ-2 на борту орбитальной станции МИР, анализ этих измерений и вывод о возможности прямого проникновения солнечных частиц вглубь магнитосферы Земли;
2. результаты измерений квазипериодических пульсаций высокoenергичных электронов на атмосферной границе РП Земли в эксперименте МАРИЯ-2 на борту ОК МИР

3. численная модель расчета процессов распространения высокозергичных заряженных частиц на атмосферной границе РП Земли, учитывающая реальную конфигурацию геомагнитного поля и процессы взаимодействия частиц с остаточной атмосферой Земли;
4. методика моделирования процесса распространения волны высокозергичных частиц в околосземном космическом пространстве, созданных локальными возмущениями РП Земли и результаты расчета временных профилей пульсаций частиц при их регистрации на ИСЗ;
5. методика определения физических характеристик локальных возмущений потоков высокозергичных заряженных частиц в околосземном космическом пространстве (энергетический спектр, координаты локального возмущения, время возмущения) по результатам измерения на ИСЗ временных профилей пульсаций частиц;
6. результаты восстановления энергетических, пространственных и временных характеристик пульсаций протонов и электронов, по измеренным в экспериментах МАРИЯ-2 и CRRES временным профилям тайма счета частиц.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В Главе 1 (Введение) дается обзор экспериментальных данных по наблюдению быстрых вариаций потоков заряженных частиц, методов расчета и анализа распространения частиц в окрестности Земли и демонстрируется актуальность и практическая ценность изучения именно быстрых пульсаций потоков высокозергичных частиц. Быстрые вариации (от нескольких секунд до нескольких минут) в потоках заряженных частиц в окрестности Земли и их взаимосвязь с разного рода гео- и геофизическими процессами постоянно находятся в зоне научного внимания. К ним можно отнести проникновение высокозергичных частиц от солнечных вспышек вглубь магнитосферы Земли, пульсации электронов и протонов во внешнем радиационном поясе (РП) Земли, высыпания частиц из внутреннего РП Земли, вызванные геофизическими причинами, образование нестационарных радиационных полей высокозергичных электронов и протонов в зазоре между внешним и внутренним РП Земли.

В ряде экспериментов на борту ОК САЛЮТ-7, ОК МИР, ИСЗ МЕТЕОР-3, INTERCOSMOS-BULGARIA-1300, ОРЕОЛ-3 были обнаружены всплески высокозергичных (энергия частиц – нескольких десятков МэВ) заряженных частиц, высыпающихся из РП Земли. Было показано, что всплески частиц могут наблюдаться за несколько часов (2-4 часа) до начала активной фазы землетрясения, причем пространственные характеристики высыпаний взаимосвязаны с географическими координатами землетрясений ( $L$  оболочка высыпаний частиц практически совпадает с  $L$  оболочкой землетрясений). Таким образом, эти явления могут рассматриваться как краткосрочный предвестник землетрясений.

Экспериментальные данные наблюдений быстрых вариаций высокозэнергичных электронов и протонов в зазоре между внутренним и внешним РП были получены с помощью научной аппаратуры, установленной на борту ИСЗ CRRES. 24 марта 1991 г. ИСЗ CRRES зарегистрировал создание нового РП Земли в зазоре между внешним и внутренним поясами, состоящего как из электронов, так и из протонов, причем энергия электронов превышала 15 МэВ.

Широкий спектр различных явлений может служить причиной быстрых вариаций заряженных частиц в окрестности Земли. Для объяснения события, зарегистрированного на ИСЗ CRRES авторами эксперимента была предложенная модель образования нестационарного пояса электронов и протонов в зазоре между РП Земли: энергичные частицы от мощной солнечной вспышки были ускорены возникшим, во время внезапного начала магнитосферной бури, электрическим биполярным импульсом и проникли в зазор между РП Земли из-за изменения конфигурации геомагнитного поля (ГМП), которое также было вызвано началом магнитосферной бури.

Особый научный интерес как в области фундаментальных, так и прикладных исследований играет экспериментальное изучение быстрых вариаций в потоках высокозэнергичных заряженных частиц на атмосферной границе внутреннего РП. Такие вариации в потоках частиц могут быть связаны с сейсмической активностью Земли. Качественная, непротиворечивая экспериментальным фактам модель пространственно-временной взаимосвязи между всплесками высокозэнергичных заряженных частиц на атмосферной границе РП и сейсмической активностью Земли по литературным данным на сегодняшний день выглядит следующим образом. Ультразвукочастотное электромагнитное излучение формируется в очаге будущего землетрясения за несколько часов до начала активной фазы и распространяясь вверх доходит до нижней границы РП Земли, где резонансно взаимодействует с заряженными частицами. Это резонансное взаимодействие приводит к изменению пятч-угла частицы и, как следствие, к уменьшению высот точек отражения. Вследствие дрейфа частиц вокруг Земли на дрейфовой L оболочке, эти высыпания частиц из внутреннего РП могут формировать волны частиц, которые могут регистрироваться во всех областях пространства, где орбита ИСЗ пересекает данную L оболочку.

Задача аналитического изучения движения заряженных частиц в ГМП имеет два аспекта: корректное представление магнитного поля Земли и решение уравнений движения заряженной частицы в заданном магнитном поле. Необходимо отметить, в общем случае решение уравнения движения заряженной частицы в поле диполя и, тем более, в реальном поле не имеет точного аналитического решения. Для аналитического решения уравнения движения частицы в ГМП приходиться вводить некоторые приближения и/или ограничения на области движения частицы либо на энергию частицы. Широко известны теория Штермера и теория дрейфового приближения (теория Альвенса).

Очевидно, что для проведения точных расчетов траекторий высокозергичных заряженных частиц без введения дополнительных ограничений на физические характеристики окружающего пространства (модель ГМП Земли, модель атмосферы Земли) и на энергию частицы, необходимо использовать численные методы решения уравнений распространения частицы в околоземном космическом пространстве. По-видимому, использование численных методов является единственным способом получения точного решения задачи распространения высокозергичных заряженных частиц как на небольших высотах (на атмосферной границе РП Земли), где конфигурация ГМП Земли сильно отклоняется от диполя и влияние остаточной атмосферы на движение частиц велико, так и на больших высотах вплоть до внешнего РП Земли. Основная трудность подобных расчетов заключается в следующем: использование реальной конфигурации ГМП Земли в расчетах приводит к значительному увеличению времени, необходимого для расчета траектории. Поэтому, в основном, для расчета траекторий частиц использовалась дипольная модель ГМП или модель ГМП, представленная рядом Гаусса с шестью гармониками.

Данная диссертационная работа посвящена анализу результатов экспериментальных измерений временной структуры всплесков высокозергичных протонов и электронов в околоземном космическом пространстве, моделированию процессов распространения возмущений в потоках частиц и формирования пульсаций высокозергичных протонов и электронов в магнитосфере Земли.

В Главе 2 описаны результаты экспериментальных измерений потоков высокозергичных заряженных частиц в эксперименте МАРИЯ-2 в околоземном космическом пространстве. С точки зрения экспериментальной регистрации и анализа событий, связанных с быстрыми вариациями заряженных частиц в окрестности Земли, целесообразно разделить такие события по временному профилю темпа счета частиц.

Вариации в потоках могут быть связаны с прямым наблюдением высокозергичных заряженных частиц внутри магнитосферы в высоколатитной зоне ( $L \sim 5$ ) от Галактических и/или солнечных источников, например от мощных солнечных вспышек. Временной профиль темпа счета частиц таких событий не имеет ярко выраженную периодическую структуру. Другой ряд событий можно отнести к регистрации быстрых пульсаций высокозергичных заряженных частиц, захваченных или квазизахваченных ГМП. Эволюция темпа счета частиц таких событий имеет квазипериодическую структуру, причем длительность таких пульсаций определяется параметрами  $L$ , в и энергетическим спектром частиц и может составлять от нескольких секунд до нескольких десятков минут.

В эксперименте МАРИЯ-2, проводимом на борту ОК МИР были зарегистрированы потоки высокозергичных заряженных частиц от солнечной вспышки 30 октября 1991 г. и несколько событий, представляющих собой квазипериодические пульсации высокозергичных заряженных частиц на атмосферной границе РП, связанных с геофизической активностью Земли.

Эксперимент МАРИЯ-2, проводимый на борту ОК МИР с 1988 г. (круговая орбита, высота ~ 400 км., наклонение ~ 51°) посвящен различному изучению пространственных, энергетических и временных характеристик потоков высоконергичных электронов и позитронов в околоземном космическом пространстве, исследование их вариаций, взаимосвязи с гелио и геофизическими явлениями. Эксперимент выполняется отдельными сеансами измерений. Измерения выполняются с помощью уникальной аппаратуры – времепролетного магнитного спектрометра-телескопа МАРИЯ-2, функционирующего в настоящее время на орбитальной станции МИР.

Прибор МАРИЯ-2 состоит из гаммоскопических сцинтилляционных счетчиков и постоянного магнита, окруженного охранным счетчиком антисовпадений. Гаммоскопические счетчики состоят из набора полос. Заряженная частица регистрируется верхними счетчиками и попадает в область магнитного поля. В ней траектория частицы искривляется, и она регистрируется одной из полос нижнего счетчика. Угол прилета измеряется по координатам в верхних счетчиках, а величина отклонения траектории в магнитном поле от прямой линии определяется координатой в нижнем счетчике. Верхние и нижние счетчики образуют времепролетную систему, которая позволяет не только определять направление прилета частиц, но и измерять время пролета. При этом по знаку отклонения в магнитном поле определяется знак заряда частицы.

Спектрометр позволяет регистрировать и идентифицировать заряженные частицы: электроны и позитроны (15–200 МэВ), протоны (35–100 МэВ), ионы (15–60 МэВ). Геометрический фактор прибора  $2 \text{ см}^2 \text{ср}$ , угловое разрешение  $2^\circ$ , энергетическое разрешение 20% в диапазоне импульсов 20–70 МэВ/c.

В октябре-ноябре 1991 года измерения были направлены на регистрацию солнечных космических лучей. Для измерений были выбраны участки орбиты с наименьшей вертикальной пороговой жесткостью (невозмущенный случай) ~ 800 МэВ, что соответствует пороговой кинетической энергии для протонов ~ 300 МэВ. При прохождении высокоширотной области околоземного пространства ( $L \sim 4.6$ ) в 0730 UT прибор зарегистрировал резкое увеличение темпа счета протонов (35–100 МэВ). Регистрируемые при этом прохождении потоки протонов были образованы во время мощной солнечной вспышки класса ЗВ 30.10.91 в 0615 UT ( $\varphi_0 = S08$ ,  $\lambda_0 = W26$ ). Энергия, масса и знак заряда отдельной частицы восстанавливались, используя функцию отклика прибора МАРИЯ-2 на основе информации о времени пролёта и угле отклонения частицы в поле постоянного магнита.

Полученный интегральный спектр протонов хорошо аппроксимируется в диапазоне энергий 35–100 МэВ степенной зависимостью с показателем спектра  $\gamma = -2.7 \pm 0.5$ . Было проведено сравнение этого спектра со спектрами полученными в тот же временной интервал ИСЗ GOES-7 ( $L \sim 6.6$ ), МЕТЕОР-3 в полярной шапке ( $L \sim 22$ ) и аппаратурой ЛЮЛИН на ОК МИР. Следует отметить практически одинаковую форму спектров и значения потоков при энергии протонов более 50 МэВ в экспериментах МАРИЯ-2, GOES-7 и МЕТЕОР-3 с одной стороны и отличие в абсолютных значениях потоков

протонов, измеренных в эксперименте ЛЮЛИН с другой стороны. Измерения потоков частиц приборами МАРИЯ-2 и ЛЮЛИН проводились в одинаковых условиях, но разными экспериментальными методами. Спектрометр МАРИЯ-2 непосредственно измеряет энергию зарегистрированных протонов, тогда как, в эксперименте ЛЮЛИН спектр протонов был получен косвенно, на основе предположения о постоянстве пороговой жесткости и равенстве этой величины пороговой жесткости в невозмущенной магнитосфере (~730 МВ), что, очевидно, не так. По-видимому, это привело к резкому завышению энергии, приписываемой зарегистрированному потоку протонов. Совпадение спектров протонов от солнечной вспышки, измеренных прибором МАРИЯ-2, на ИСЗ GOES-7 и МЕТЕОР-3 указывает на возможность прямого проникновения солнечных частиц внутрь магнитосферы Земли вследствие изменения конфигурации ГМП.

Одной из задач эксперимента МАРИЯ-2 является экспериментальное наблюдение быстрых вариаций высокозэнергичных заряженных частиц на атмосферной границе РП, вызванных геофизической активностью Земли и, в частности, сейсмической активностью.

Для поиска быстрых вариаций высокозэнергичных заряженных частиц, связанных с геофизической активностью Земли, в эксперименте МАРИЯ-2 были выбраны участки орбиты ОК МИР, удовлетворяющие следующим требованиям:

1. минимальное значение L параметра ( $L \sim 1+1.7$ ), так как основное количество сильных землетрясений концентрируются вблизи экваториальной зоны;
2. возможно большее время нахождения ОК МИР на близких L оболочках для регистрации всплесков с длительностью несколько минут.

Используя этот метод поиска всплесков высокозэнергичных заряженных частиц в эксперименте МАРИЯ-2 было зарегистрировано несколько десятков всплесков заряженных частиц, из которых, для последующего анализа были выбраны всплески, имеющие характерную квазипериодическую временную структуру. Такое поведение темпа счета связано с многократным прохождением заряженных частиц через область регистрации вследствие дрейфа частиц вокруг Земли. Период таких пульсаций определяется периодом дрейфа частиц вокруг Земли и, в конечном счете, энергетическим спектром частиц и L, В параметрами движения частиц.

Был выделен ряд событий, имеющих временную структуру. Для последующего анализа были отобраны 3 события, связанные, по-видимому, с многократным прохождением частиц через область регистрации (10.11.91, 31.03.94, 16.06.96). Как показали расчеты, вероятность имитации таких квазипериодических структур в результате статистических флуктуаций пуссоновского потока частиц со средним значением темпа счета  $\sim 0.5+1 \text{ с}^{-1}$  за все время наблюдения (~300 сеансов) составляет величину не более 0.01 %. В эксперименте МАРИЯ-2 было экспериментально зарегистрировано несколько событий, характеризующихся квазипериодической структурой темпа счета, что говорит о

тому, что природа формирования таких структур не связана со статистическими флуктуациями фонового потока частиц. Пространственные характеристики этих событий приведены в таблице.

Дата	10.11.91	31.03.94	16.06.96
T	09:13+09:18	07:16+07:31	16:28+16:35
$\lambda$ , град.	346+358	288+328	345+358
L	1.67+2.45	1.1+1.31	1.4+1.7
B, Гс	0.253+0.281	0.227+0.243	0.244+0.26
h, км	70+200	100+300	80+200

где: T – московское время регистрации события,  $\lambda$  и L – соответственно диапазон географических долгот и L оболочка местоположения ОК МИР, B – диапазон значений геомагнитной индукции точек отражения, h – минимальная высота, которой достигает траектории частиц в процессе долготного дрейфа. Отметим, что при регистрации события 10.11.91 ( $L=1.67+2.45$ ) прибор МАРИЯ-2 измерял пульсации потоков электронов, которые могут принадлежать нестационарному поясу высокозергетичных электронов, образовавшемуся после проникновения частиц от мощной солнечной вспышки в конце марта 1991 г.

Для выявления причин возмущений потоков электронов был проведен анализ геофизической обстановки для заданных временных интервалов. Ниже приведена сейсмическая обстановка на эти временные интервалы (L оболочка землетрясений близка к L оболочки всплеска).

	10.11.91	31.03.94	16.06.96
T, UT	9:37	8:34	17:40
L	1.46	1.12	1.2
$\lambda$ , град.	183	291	288
Магнитуда	5.3	3.8	4.5

Дни 31.03.94 и 16.06.96 характеризовались спокойной магнитной обстановкой ( $K_p=1$ ) и отсутствием мощных солнечных вспышек. Таким образом, вероятно события 31.03.94 и 16.06.96 могут быть связаны с землетрясениями, указанными выше. Событие 10.11.91 было зарегистрировано в зазоре между внешним и внутренним РП Земли, причем геомагнитная обстановка была сильно возмущенной ( $Dst=-112$  нТс). По-видимому, данное возмущение потоков высокозергетичных электронов могло быть вызвано возмущением ГМП.

В Главе 3 описана разработанная численная модель процессов распространения высокозергетичных заряженных частиц на атмосферной границе РП Земли, учитывающая реальную конфигурацию геомагнитного поля, представленную рядом сферических функций, и взаимодействие частиц с остаточной атмосферой Земли.

В общем случае, процесс формирования всплесков протекает в два этапа. На первом этапе происходит взаимодействие частиц с возмущающими факторами и образование сгустков заряженных частиц в околосолнечном космическом пространстве. На втором этапе сгусток частиц распространяется в магнитосфере, формируя волну дрейфующих вокруг Земли частиц. Несмотря на то, что механизмы генерации сгустков частиц могут существенно отличаться, процессы во второй фазе, дрейф сгустка частиц в ГМП, имеют общую картину.

Существенные особенности решаемой задачи долготного распространения сгустка частиц связаны, во-первых, с необходимостью использования точной модели ГМП, поскольку рассматривается движение частиц на внутренних L-оболочках магнитосферы, где влияние мультипольных компонент ряда особенно велико, и, во-вторых, с необходимостью вычисления точной траектории частиц, так как плотность атмосферы и геомагнитная индукция могут существенно изменяться на расстоянии порядка ларморовского радиуса для частиц с энергиями выше нескольких десятков МэВ. Поэтому, даже на одном циклотронном обороте частица заметно теряет энергию и может рассеиваться из-за взаимодействия с атомами атмосферы. Эти физические процессы приводят к изменению текущего ларморовского радиуса частицы, формы траектории, положения зеркальных точек и т.д. Изменение величины геомагнитной индукции на характерных расстояниях порядка ларморовского радиуса, особенно для высокозэнергичных частиц дополнительно деформирует траекторию частицы, что не позволяет использовать различные приближения, например, приближение ведущего центра.

То, численное интегрирование уравнения движения высокозэнергичной заряженной частицы в реальном ГМП с учетом процессов взаимодействия с остаточной атмосферой предоставляет, по-видимому, единственную возможность описать реальные процессы распространения заряженных частиц на атмосферной границе РП Земли. Возможность проведения подобных расчетов стала реальностью с развитием как точных моделей ГМИ и плотности атмосферы, так и с быстрым развитием мощных вычислительных систем.

Использовался следующий метод расчета траектории частицы: уравнение движения заряженной частицы в ГМП численно интегрировалось методом Рунге-Кутта 4 порядка точности. Преимуществом данного метода интегрирования является устойчивость решения, отсутствие необходимости отдельной программы для начала интегрирования и возможность легко изменять шаг интегрирования, что очень важно для контроля точности. В качестве модели ГМП использовалась модель IGRF '95 с 10 гармониками, в качестве модели плотности атмосферы Земли использовалась либо эмпирическая статическая модель плотности для баллистического обеспечения полетов спутников Земли, либо модель MSIS-86. На каждом шаге интегрирования моделировались процессы взаимодействия частиц с остаточной атмосферой Земли: ионизационные потери энергии, тормозное излучение электронов, кулоновское рассеяние электронов. В рамках данной модели можно рассчитывать корректно движение

высокоэнергичных заряженных частиц на атмосферной границе РП Земли не вводя дополнительных упрощений и/или ограничений на область движения и энергию частицы.

Далее, накапливаясь необходимая статистика, создавались базы данных, включающие траектории частиц с выбранными параметрами модели и строились статистические распределения: энергетические спектры, питч-угловые распределения и т.д.

Необходимо отметить следующие преимущества рассматриваемой модели перед другими методиками расчета движения заряженных частиц в околосолнечном пространстве: траектория частицы рассчитывается корректно даже, если индукция геомагнитного поля или плотность атмосферы меняются значительно на одном циклотронном обороте частицы. Точность расчета траектории частицы зависит только от величины шага интегрирования, точности используемых моделей ГМП и плотности атмосферы Земли.

При изучении распространения всплесков частиц на атмосферной границе РП Земли огромную роль играют процессы, приводящие к гибели частиц в атмосфере. В основном, частица теряет энергию при распространении в районе БМА, где зеркальная точка опускается вглубь атмосферы. В данной работе в качестве параметра, характеризующего распространение заряженной частицы вокруг Земли, используется вероятность для частицы совершить полный долготный оборот (Eff). Эта величина зависит от многих параметров – энергия частицы, параметры E, B, геомагнитная эпоха и т.д. Определяющим параметром является суммарное количество вещества, пройденное частицей в районе БМА. Суммарное количество вещества, которое прошла частица, определяется как общую величину потерь энергии на ионизацию и тормозное излучение, так и величину углового рассеяния частиц, которое является дополнительным процессом, приводящим к гибели частиц в атмосфере.

Расчеты, проведенные в рамках описанной модели, показали, что характерными особенностями зависимостей Eff от энергии частиц являются резкий рост (в области низких энергий – несколько МэВ), плато на уровне ~100 % в области нескольких десятков МэВ и достаточно медленный спад (в области энергий более 200 МэВ). Это связано с тем, что частицы низких энергий быстро гибнут в атмосфере в результате ионизационных потерь энергии. С другой стороны, частицы больших энергий имеют большой ларморовский радиус, поэтому они глубже проникают в атмосферу и также гибнут.

Электроны, в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до сотни МэВ, имеют практическую 100% вероятность совершить полный долготный оборот. Следовательно, всплеск будет иметь относительно большое время жизни. Подчеркнем, что существует достаточно широкий диапазон энергий, где потери энергии невелики и частицы могут многократно обойти вокруг Земли, хотя питч-угол этих частиц лежит в конусе потерь (высота кедущего центра опускается до 130 км.). Следовательно, понятие конуса потерь при изучении движений высокозаряженных частиц на атмосферной границе РП Земли необходимо расширить, включив в него энергетическую

зависимость. Если эффективность прохождения области БМА близка к 100% и потери энергии на одном обороте вокруг Земли незначительны, то частицы могут многократно обойти вокруг Земли, формируя волну, которая будет тем не менее постепенно затухать из-за потерь энергии частиц в атмосфере и распыления в пространстве из-за дисперсии угловой скорости долготного дрейфа. Такая волна частиц, многократно проходя одну и ту же область околоземного пространства, может при определенных условиях формировать в этой области квазипериодические затухающие пульсации потоков частиц.

В Главе 4 приведены результаты расчета движения частиц, выполненные в рамках модели, изложенной в Главе 3, методика расчета пульсаций частиц на атмосферной границе РП Земли.

Методика моделирования процесса формирования квазипериодических пульсаций потоков частиц в околоземном пространстве проводилась по следующему сценарию. На основе начальных параметров локального возмущения РП (энергетический спектр,  $L$ , В координаты, географическая долгота и т.д.) и полученных ранее статистических распределений (угловая скорость дрейфа в ис. области БМА, потери энергии и время дрейфа в области БМА), рассчитывалось время движения частицы до области регистрации на первом, втором и т.д. оборотах. Далее набиралась достаточная статистика (~10000 траекторий) и строился временной профиль темпа счета частиц. Расчеты, проведенные в рамках описанной методики показали, что, при определенных условиях (высота точки отражения не ниже ~100 км.) в околоземном космическом пространстве и, в частности, на атмосферной границе РП:

1. могут существовать пульсации частиц с периодом (1+3 мин.), связанные с многократным прохождением частиц через область регистрации;
2. квазипериодическая структура в темпе счета частиц сохраняется как в случае "мгновенного" локального возмущения, так и в случае постоянного возмущения РП Земли;
3. время затухания таких пульсаций составляет ~10+20 мин., поэтому волны частиц успевают сделать до затухания несколько оборотов вокруг Земли.

Если эффективность прохождения области БМА низкая (дрейфовая оболочка расположена в глубинах атмосферы Земли, где потери энергии частиц на одном обороте вокруг Земли значительны), то будет наблюдаться одиночный всплеск частиц без внутренней временной структуры.

В общем случае эволюция темпа счета частиц зависит от набора первоначальных физических параметров, зависящих от конкретного механизма образования всплеска частиц. Временной профиль темпа счета частиц в месте регистрации зависит от временных (длительность образования всплеска частиц), энергетических (энергетический спектр) и пространственных характеристик процесса (разница географических долгот области образования всплеска частиц и места регистрации). Проведенные расчеты показали существенные отличия во временных профилях темпов счета для различных значений долготы области образования всплеска частиц. Т.е. время регистрации максимального значения темпов

счета, ширина первого пика, соотношение между значениями темпа счета в первом и втором пиках зависят от разницы географических долгот области образования всплеска частиц и места регистрации. Это предоставляет возможность определения некоторых физических характеристик первоначального всплеска частиц, используя сравнение экспериментального и симулированных временных профилей темпа счета частиц при различных начальных условиях моделирования.

В Главе 5 приведены результаты анализа процессов формирования квазипериодических пульсаций потоков частиц, зарегистрированных в экспериментах МАРИЯ-2 на борту ОК МИР и на ИСЗ CRRES.

Для оценки возможности восстановления физических характеристик локальных возмущений РП (области образования всплеска частиц) было выполнено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных полученных в эксперименте МАРИЯ-2 на борту ОК МИР и научной аппаратурой на ИСЗ CRRES.

Для сравнения с экспериментальными данными были выбраны события 10.11.91, 31.03.94, 16.06.96 зарегистрированные телескопом-спектрометром МАРИЯ-2 на борту ОК МИР. Характеристики этих событий описаны выше. Сравнение экспериментальных и рассчитанных временных профилей для этих событий и восстановление физических параметров всплесков частиц (географическая долгота образования всплеска, энергетический спектр) выполнялось с помощью процедуры нахождения минимума функции  $\chi^2$  в зависимости от значения свободного параметра. Проведенные расчеты выявили, что функция  $\chi^2$  имеет один минимум как в случае восстановления географической долготы образования всплеска так и в случае определения энергетического спектра частиц. В таблице приведены восстановленные значения физических параметров событий, минимальные значения функции и соответствующие степени свободы.

Дата	$E_0$ , МэВ	$\gamma$	$\Delta\lambda$ , град	$\lambda_0$ , град	$\chi^2_{min}$	v
10.11.91	50±5	-2±4	350±50*	5	5.3	8
31.03.94	40±5	-6±9	230±300	275	3.8	4
16.06.96	25±5	-6±9	230±350	340	2.7	5

где:  $\lambda_0$  – значение географической долготы высapsulation частиц для минимального значения функции  $\chi^2$ ,  $\Delta\lambda$  – диапазон восстановленной географической долготы (\* – диапазон долгот 350±50 означает, что область высapsulation частиц находилась в пределах 60°).

Необходимо отметить достаточно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных для восстановленных физических параметров.

Выше была описана геофизическая обстановка для данных событий и проанализированы возможные источники возмущений высоконергетичных электронов. Анализируя диапазон восстановленных долгот, значение L оболочки и время регистрации возмущения в совокупности с данными сейсмической

активности можно сделать вывод, что, по-видимому, возмущения высокозэнергичных электронов РП Земли в событиях 31.03.94 и 16.06.96 могли быть вызваны подготовкой мощных землетрясений.

В рамках модели взаимосвязи между очагами землетрясений и возмущениями в потоках высокозэнергичных заряженных частиц РП Земли, данные землетрясения могут служить источником возмущений в потоках электронов, зарегистрированных прибором МАРИЯ-2 31 марта 1991 г. и 16 июля 1996 г. Т.о., пульсации или всплески потоков высокозэнергичных электронов в этих событиях могут играть роль предвестников сильных землетрясений, причем используя методику восстановления пространственных координат области высыпания частиц, можно, в принципе, предсказать область готовящегося землетрясения.

ИСЗ CRRES (Combined Release and Radiation Effects Satellite) предназначены для изучения околоземного космического пространства и был запущен на орбиту ( $323 \times 33575$  км.) 25 июля 1990 г. с наклонением  $\sim 18.2^\circ$ . Научная аппаратура, предназначенная для регистрации энергичных заряженных частиц состояла из водного Чертковского детектора, который имел несколько порогов регистрации электронов ( $E > 6$  МэВ,  $E > 9$  МэВ,  $E > 13$  МэВ). Для регистрации протонов с энергией, не превышающей 100 МэВ, использовался телескоп на основе набора кремниевых детекторов.

24 марта 1991 г. научная аппаратура на борту ИСЗ CRRES зарегистрировала существенное увеличение темпов счета заряженных частиц (протоны и электроны с энергией более 10 МэВ) инжектированных в зазор между внутренним и внешним РП. Профили темпов счета электронов и протонов являются примером быстрых вариаций заряженных частиц в околоземном космическом пространстве. Пики в эволюции темпов счета связаны с многократным прохождением заряженных частиц, первоначально инжектированных в зазор между внутренним и внешним РП Земли, через область регистрации.

В предположении инжекции протонов и электронов в одно и тоже время и в одну и ту же область околоземного пространства, авторы ИСЗ CRRES, используя скорости дрейфа электронов и протонов в дипольном приближении ГМП и временную разницу между первыми пиками получили значение географической долготы инжекции частиц. Энергетический спектр электронов был получен исходя из временной разницы между первым и вторым пиком (период оборота электрона вокруг Земли, рассчитанный по дипольной модели ГМП), значение показателя спектра – используя наклон нарастания темпа счета электронов во втором пике. Полученные авторами ИСЗ CRRES пространственные и энергетические характеристики события приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип частиц	Вид спектра	$E_0$ , МэВ	$\gamma$	$\lambda_0$ , град	$t_{\text{ макс}}$ , UT
электроны	степенной	15	-6	244	13300
протоны	–	25	–	244	13300

означает не определен.

Для восстановления пространственных и энергетических характеристик инжектированных частиц была применена описанная выше методика (сравнение смоделированных и экспериментального временного профиля темпа счета частиц методом минимизации функции  $\chi^2$  в зависимости от значения свободного параметра). Проведенные расчеты показали, что функция  $\chi^2$  имеет один минимум.

Результаты восстановления географической долготы, проведенные в предположении, упомянутом выше, показали практическое совпадение значения  $\lambda_0 = 245^\circ$ . Но, на сегодняшний день не существует ни экспериментальных, ни теоретических доказательств того, что электроны и протоны стартовали одновременно и из одной точки пространства. Более того, ГМП должно разделять нерелятивистские протоны и релятивистские электроны во время их внедрения из межпланетного космического пространства в зазор между внешним и внутренним РП Земли. Приближение одновременности начала инъекции и дрейфа протонов и электронов в ГМП является также достаточно условным. В таблице 2 приведены пространственные и временные характеристики электронов и протонов восстановленных без учета предположения об инъекции протонов и электронов в одно и тоже время и в одну и ту же область околоземного пространства.

Таблица 2

Тип частиц	Вид спектра	$\gamma$	$E_0, \text{ МэВ}$	$\lambda_0, \text{ град}$	$t_{\text{инж.}}, \text{ UT}$
электроны	степенной	-12	14.5	215	13288
протоны	*	*	25.5	245*	13300*

\* – означает, что не вводя дополнительных предположений невозможно определить физическую характеристику из-за того, что масштаб резкого изменения темпа счета протонов и ширина пиков во временном профиле практически совпадают и невозможно определить, например, наклон нарастания первого пика.

Из значения  $\lambda_0$ , приведенного в таблице 2, можно заключить, что, по-видимому, электроны были инъектированы в момент времени внезапного начала магнитосферной бури (13286 UT). Сравнивая значения, приведенные в таблицах 1 и 2 следует обратить внимание на практическое совпадение значения "базовой" энергии  $E_0$  для протонов и электронов, полученных авторами ИСЗ CRRES и в данной работе с одной стороны и на существенные отличия в показателе энергетического спектра электронов с другой стороны. В рамках описанной выше модели был смоделирован временной профиль темпа счета электронов с показателем спектра  $\gamma = -6$ . Из результатов этого моделирования очевидны существенные различия в зависимостях (ширина пиков, наклон нарастания первого и второго пиков, различие между максимальным и минимальным значением темпа счета и т.д.). В то время как экспериментальный и смоделированный ( $\gamma = -12$ ), темпы счета электронов практически совпадают. Необходимо отметить, что конечным результатом инъекции частиц от солнечной вспышки явилось

образование в данной области околоземного пространства нового, нестационарного пояса высокозэнергичных электронов. Энергетический спектр электронов, полученный в данной работе ( $y=12$ ), совпадает с прямыми измерениями энергетического спектра электронов этого нового радиационного пояса Земли, выполненным прибором МАРИЯ-2 на борту ОК МИР ( $y=13\pm 5$ ).

Таким образом, измерения быстрых вариаций (пульсаций) потоков высокозэнергичных заряженных частиц, захваченных ГМП на границе РП Земли, предоставляют принципиальную возможность определения энергетических и пространственных параметров всплесков частиц, вызванных геофизической активностью. В частности, если всплеск частиц вызван сейсмической активностью Земли, существует возможность определения диапазона географических долгот и широт готовящегося землетрясения.

#### В ходе работы получены следующие основные результаты:

1. Показано, что восстановленный энергетический спектр протонов от солнечной вспышки 30.10.91, измеренный телескопом-спектрометром МАРИЯ-2 на борту ОК МИР внутри магнитосферы Земли, совпадает со спектрами протонов вне магнитосферы, зарегистрированных на КА (GOES-7, МЕТЕОР-3), что указывает на возможность прямого проникновения протонов от солнечной вспышки в магнитосферу Земли (кинетическая энергия протонов существенно меньше пороговой кинетической энергии в стационарном случае);
2. Проведен анализ результатов экспериментальных измерений пульсаций высокозэнергичных заряженных частиц (эксперимент МАРИЯ-2), три из которых (10.11.91, 31.03.94 и 16.06.96) представляют квазипериодические пульсации потоков электронов, с характерным периодом порядка периода дрейфа высокозэнергичных частиц вокруг Земли;
3. Проанализированы возможные солнечные и геофизические источники данных возмущений: пульсации частиц 10.11.91 – выбросание из нестационарного пояса электронов, пульсации частиц 31.03.91 и 16.06.96 могут иметь сейсмическую природу;
4. Разработана численная модель процессов распространения высокозэнергичных заряженных частиц (1–1000 MeV) на атмосферной границе РП Земли, учитывающая реальную конфигурацию геомагнитного поля, представленную рядом сферических функций, и взаимодействие частиц (ионизационные и тормозные потери энергии частиц, кулоновское рассеяние) с остаточной атмосферой Земли (динамические модели атмосферы Земли);
5. Проведено моделирование движения высокозэнергичных протонов и электронов на атмосферной границе РП Земли с использованием модели, учитывающей реальную конфигурацию ГМП, динамическую модель плотности атмосферы и процессы взаимодействия частиц с остаточной атмосферой Земли. Показано, что:

- 5.1 при распространении заряженных частиц на атмосферной границе РП существуют энергетические диапазоны, где частица имеет ~100 % вероятность долготного распространения (от нескольких МэВ до нескольких сот МэВ);
  - 5.2 на атмосферной границе РП Земли могут существовать квазипериодические вариации потоков частиц (период ~ 1-3 мин.), связанные с многократным прохождением частиц через область наблюдения в указанном выше энергетическом диапазоне, причем время существования вариаций может достигать десятков минут;
6. На основе расчетов, выполненных в рамках этой модели разработана методика расчета временных профилей пульсаций высокозергичных заряженных частиц, формируемых при локальных возмущениях РП Земли;
  7. Выполнено моделирование пульсаций потоков электронов, зарегистрированных прибором МАРИЯ-2 на борту ОК МИР 10.11.91, 31.03.94 и 16.06.96 на атмосферной границе РП Земли. Для этих событий определены географические долготы областей высыпания электронов и их энергетические спектры;
  8. Показано, что источником возмущений в потоках высокозергичных электронов зарегистрированных прибором МАРИЯ-2 на борту ОК МИР 31.03.94 г. и 16.06.96 г. могли быть сильные землетрясения, произошедшие через ~ 2-4 часа после регистрации пульсаций частиц;
  9. Выполнено моделирование пульсаций потоков протонов и электронов, зарегистрированных на борту ИСЗ CRRES 24.03.91 в зазоре между внешним и внутренним РП Земли. Для данного события, с помощью разработанной методики, определены географические долготы места инъекции электронов и протонов, энергетические спектры протонов и электронов, время инъекции частиц и длительность инъекции частиц;
  10. Показано совпадение времени инъекции электронов и висячего начала магнитосферной бури для события 24.03.91 г.;
  11. Проведено сравнение восстановленных энергетических спектров протонов и электронов с данными, полученными другими авторами; показано, что энергетический спектр электронов (24.03.91 г.), полученный в данной работе ( $\gamma = 12$ ) совпадает с результатами прямых измерений энергетического спектра электронов нестационарного РП Земли, выполненных прибором МАРИЯ-2 на борту ОК МИР ( $\gamma = 13 \pm 5$ ) и существенно отличается от спектра, полученного авторами ИСЗ CRRES ( $\gamma = 6$ ).

Основное содержание диссертации представлено на 14-ти конференциях и опубликовано в 14-ти научных работах. Наиболее полно материалы диссертации представлены в следующих опубликованных трудах научных конференций и печатных работах:

1. А.Г. Батищев, А.М. Мурашов и др. Спектрометр заряженных частиц для исследования сейсмо-магнитоосферных связей. Сборник докладов 5-ой международной школы-семинара "Автоматизация исследований в ядерной физике и астрофизике". Изд. МГУ, 1993.
2. А.М. Гальпер, ..., А.М. Мурашов и др. Регистрация солнечных частиц 31 октября 1991 г. в окрестности Земли. Космические исследования, V.33, N.6, 1995.
3. A.M. Galper, ..., A.M. Murashov et al. The Observation of solar flare protons with energy exceeding 30 MeV in vicinity of the Earth on board station MIR on 30 October 1991. Proc. 24<sup>th</sup> ICRC, SH-session, Roma, 1995,
4. М.Е. Алещина, С.В. Колдашов, А.М. Мурашов, Д.Н. Рыакин. Особенности дрейфа заряженных частиц на границе радиационного пояса. Международная конференция по космическим лучам, Москва, 24-28 июня 1996.
5. A.M. Galper, ..., A.M. Murashov et al. High-Energy Charged Particle Waves on the Low Boundary of the Radiation Belt. 25<sup>th</sup> ICRC, Durban, South Africa, 1997.
6. Батищев А.Г., ..., Мурашов А.М. и др. Аппаратура для регистрации всплесков высокозэнергичных заряженных частиц в магнитосфере Земли. Сборник трудов научной сессии МИФИ, часть 2, стр. 19-21, 1998 г.
7. Алещина М.Е., ..., Мурашов А.М. и др. Нестационарные эффекты гелио-, геофизической и сейсмической природы в захваченных геомагнитным полем потоках высокозэнергичных заряженных частиц. Сборник трудов научной сессии МИФИ, часть 2, стр. 28-30, 1998 г.
8. Гальпер А.М., Колдашов С.В., Мурашов А.М. Моделирование квазипериодических пульсаций электронов в околоземном космическом пространстве. Сборник трудов научной сессии МИФИ, часть 4, стр. 56-57, 1999.