

На правах рукописи



Кашченко Николай Михайлович

**Численное исследование неустойчивости Рэля-Тейлора в
низкоширотной ионосфере.**

Специальность

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Калининград 2015

Работа выполнена в Балтийском федеральном университете имени Иммануила Канта, Институт прикладной математики и информационных технологий, Кафедра математического моделирования и информационных систем

Официальные оппоненты:

Тащилин Анатолий Васильевич, доктор физико-математических наук, с.н.с., заведующий лабораторией физики ионосферно-магнитосферного взаимодействия, Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт солнечно-земной физики Сибирского Отделения Российской Академии Наук (ИСЗФ СО РАН), г. Иркутск

Сухинов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научно-исследовательской работе и инновационной деятельности Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону.

Лобанов Алексей Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра вычислительной математики Московского физико-технического института (государственного университета), г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, кафедра прикладной математики, г. Москва.

Защита состоится _____ на заседании диссертационного совета Д002.024.03 при Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН по адресу: 125047, Москва, Миусская пл. д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук
Корнилина М. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Математические модели активных воздействий на различные геофизические системы имеют важное теоретическое и прикладное значение. Среди таких систем отметим ионосферу, как среду распространения радиоволн и работы космических аппаратов.

Изучение процессов в магнитосферно-ионосферной системе, инициированных активными воздействиями, относится к числу интенсивно развивающихся направлений физики околоземного космического пространства. Активные методы исследований широко используются в изучении электродинамического взаимодействия между ионосферой и магнитосферой, неустойчивостей в околоземной плазме, искусственных ионосферных возмущений и их влияния на распространение радиоволн. Активные воздействия на ионосферу и магнитосферу осуществляются посредством выбросов химически активных веществ, инъекции электронных и плазменных пучков с ракет и ИСЗ, мощных КВ радиоволн направленных с поверхности Земли в ионосферную плазму, исследовательских взрывов и др. Важность и значимость подобного рода исследований подтверждается проведением таких широко известных международных программ как TRIGGER, AMPTE, CRRES, HAARP. Кроме того исследования в данном направлении являются составной частью многих международных программ, включая STEP, CEDAR, SPACE WEATHER и др. Конец 90-х годов ознаменовался резким возрастанием интереса к проблеме модификации высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами. С одной стороны, это вызвано строительством первой очереди нового супермощного КВ нагревного комплекса в Гаконе на Аляске, США, (HAARP (*High Frequency Active Auroral Research Program* – Программа исследования полярных сияний высокочастотным воздействием) – американский научно-исследовательский проект по изучению ионосферы и полярных сияний. Проект запущен весной 1997 года, в Гаконе, штат Аляска до 3600 кВт) а с другой - интенсификацией исследований на супермощном КВ нагревном комплексе Европейской ионосферной Ассоциации EISCAT в Тромсе, Норвегия. Другие станции – HIPAS (Аляска, г. Фэрбанкс), SPEAR (Шпицберген), СУРА (Васильсурск) и др.

Исследование физической природы, морфологии и динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации является одной из ключевых задач физики ионосферы. Это вызвано не только чисто научным интересом к проблеме изучения атмосферы Земли как единой динамической системы, но и необходимостью решения ряда прикладных задач радиосвязи, радиолокации, навигации и т.п., поскольку такие неоднородности оказывают заметное влияние на характеристики распространяющихся радиосигналов. Среднемасштабные ионосферные неоднородности (ИН) с периодами ~1–20 мин вызывают диффузные отражения (*F*-рассеяние) в КВ диапазоне,

приводят к фазовым и амплитудным мерцаниям в метровом и дециметровом диапазонах существенно снижая эффективность функционирования спутниковых радиотехнических систем, в частности, навигационных систем GPS, GALILEO и ГЛОНАСС. Ряд данных об искажениях сигналов GPS на средних широтах во время геомагнитных возмущений не укладываются в существующие модели ионосферных мерцаний и классические представления о спектре ионосферных неоднородностей. Эти мерцания регистрируемых на земле сигналов ИСЗ связывают с дифракцией или интерференцией на изолированных ионосферных неоднородностях, расположенных в F -области и, реже, в E -слое.

Акустико-гравитационные волны (АГВ), внутренние гравитационные волны (ВГВ) и другие неоднородности нейтральной составляющей ионосферы могут приводить к появлению в ионосфере крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений. Этот процесс может инициировать или усиливать мелкомасштабные неоднородности. При этом механизм генерации неоднородностей подобен градиентно-дрейфовой неустойчивости, роль внешнего электрического поля выполняет горизонтальная компонента скорости движения нейтральных молекул. Возникновение мелкомасштабных неоднородностей при реализации данного механизма зависит от относительной амплитуды крупномасштабных волн - для более интенсивных АГВ наличие мелкомасштабной структуры более вероятно. Такие процессы могут возникать в сейсмически активных регионах и распространяться вверх с усилением, что может использоваться для мониторинга сейсмоопасных районов. Гравитационные волны с амплитудой в несколько метров в секунду, горизонтальной длиной волны несколько сотен километров и вертикальными размерами несколько десятков километров являются эффективным механизмом генерации пузырей.

Геомагнитная буря является наиболее важным источником возмущения электронной концентрации. В анализе данных, полученных с помощью метеорологической спутниковой программы DMSP в 2005 году показано, что появление плазменных пузырей происходило регулярно во время геомагнитных бурь, особенно в начальной и основной фазы. Это связано с проникновением электрических полей в экваториальную зону, создавая благоприятные условия для возбуждения неустойчивости Рэля-Тейлора.

В связи с этим представляются актуальными задачи проектирования натуральных экспериментов на основе предварительного проведения вычислительных экспериментов с использованием математических моделей среды, учитывающих различные типы антропогенных воздействий. Современные требования, предъявляемые к исследованию ионосферы, предполагают применение численных моделей позволяющих рассчитывать изменения во времени глобальных распределений ионосферных параметров в широком диапазоне гелио-геомагнитных условий. Математические модели околоземной космической плазмы обычно основаны на уравнениях квазигидродинамики. Математическое моделирование околоземного

космического пространства (ионосфера, плазмосфера, магнитосфера) обладает своей спецификой, поскольку во многом определяется энергетикой и концентрацией присутствующих в нём электронов и ионов. Ионосферная плазма является низкотемпературной с близким к максвелловскому распределением со средней энергией $kT_i \approx kT_e \approx 0,03 - 0,4$ эВ и электронной концентрацией в диапазоне $10^2 - 10^6$ см⁻³.

Теоретическое исследование низкоширотной системы ионосфера-термосфера в условиях активных воздействий затруднено следующими обстоятельствами: сильное, на несколько порядков, изменение физических характеристик околоземной анизотропной плазмы по пространственным переменным; наличие режимов с обострением, когда характерные времена процессов существенно (в 10 – 1000 раз) отличаются на разных этапах развития; нелинейность описываемых процессов; сложность химического состава среды и его изменчивость.

В связи с этим задача моделирования среды, построение самосогласованных математических моделей, описывающих ионосферные процессы с учетом ионосферно-термосферных взаимодействий, требует для своего решения разработки новых и адаптации уже имеющихся численных методов и алгоритмов, учета обширного цикла ионосферных процессов и использования высокопроизводительных вычислительных ресурсов. Таким образом, работа актуальна в связи с потребностью исследования процессов в околоземной космической плазме в приложении к проблемам науки и решению многих прикладных задач.

Цель исследования

Основной целью работы является исследование посредством численных экспериментов процессов развития в экваториальной ионосфере неустойчивостей типа Рэля-Тейлора при разных условиях и разных видах воздействий и явлений, создающих условия для развития неустойчивостей указанного типа и создание математических и численных моделей среднемасштабных явлений в низкоширотной ионосфере Земли, ориентированных на исследование этих процессов. Для выполнения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Исследование механизмов инициализации и процессов развития неустойчивости Рэля-Тейлора с помощью комплекса нестационарных математических моделей низкоширотной ионосферы, описывающих вариации параметров ионосферы с разным уровнем приближений в условиях различного типа воздействий как естественного, так и техногенного характера.

2. Исследование эффектов естественных и техногенных воздействий на низкоширотную ионосферу в условиях благоприятных для развития неустойчивости Рэля-Тейлора.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы определяется проведенными комплексными исследованиями, в результате которых вместо применения отдельных математических моделей, разработанных для индивидуальных вариантов расчетов параметров исследуемых ионосферных процессов, применены комплексы математических и численных моделей, учитывающие особенности вычислительного характера, возникающие при моделировании процессов в низкоширотной ионосфере в условиях сильных и слабых воздействий разного характера, приводящих к возникновению и развитию плазменных пузырей. Наиболее важными, определяющими научную новизну, результатами работы является следующее: разработан комплекс нестационарных гидродинамических моделей низкоширотной ионосферы с различным уровнем приближений и разным разрешением, позволяющий численно исследовать процессы развития неустойчивости Рэля-Тейлора с возможностью учета как положительных так и отрицательных ионов, позволяющий корректно описывать низкоширотную околоземную плазму в интервале высот от нижней границы E-области до высот плазмосферы в различных ситуациях воздействий; показано, что процессы развития неустойчивости Рэля-Тейлора приводят к выносу молекулярных ионов, прежде всего NO^+ на высоты внешней ионосферы; посредством численного эксперимента показано, что процессы развития неустойчивости Рэля-Тейлора приводят к температурным режимам с обострением; посредством численного моделирования показано, что геометрическая форма плазменных пузырей, развивающихся в результате неустойчивости Рэля-Тейлора является инвариантом явления для одиночных и слабо взаимодействующих пузырей; посредством численного моделирования показано, что эффекты воздействия на ионосферу антропогенных выбросов водорода, воды и других веществ могут приводить к эффектам генерации пузырей; показано, что при выполнении условий пространственного резонанса внутренние гравитационные волны могут приводить к развитию ионосферных пузырей; посредством численного эксперимента было показано, что нестационарные внешние условия, такие как изменяющиеся фоновые электрические поля и изменяющаяся меридиональная составляющая нейтрального ветра, существенно влияют на динамику развития ионосферных пузырей как количественно, так и качественно, вплоть до подавления плазменных пузырей.

Методы исследования, используемые для решения поставленных задач

Свойства процессов в низкоширотной ионосфере определяются воздействием значительного числа внешних факторов, как регулярного, так и случайного типа; достаточно сильными линейными и нелинейными связями низкоширотной области ионосферы со средне и высокоширотными областями ионосферы, термосферой и магнитосферой. Поэтому теоретическое исследование физических закономерностей осуществимо

только методами математического моделирования. В данной работе использован следующий подход при решении поставленных задач:

- на основе гидродинамических приближений сформулированы уравнения модели, методы получения начальных и граничных условий с соответствующим поставленным задачам пространственным и временным разрешением;

- для решения разных классов задач в рамках поставленной проблемы на основе разного уровня приближений получен комплекс математических моделей;

- для этих моделей выбраны, модифицированы и/или созданы численные методы решения на основе разностных схем и алгоритмов решения этих разностных схем;

- на основе созданного комплекса моделей проведены вычислительные эксперименты с контролем качества получаемых результатов на основе сравнения с результатами других работ и экспериментальных данных.

Достоверность полученных результатов определяется:

- физическим обоснованием механизмов возникновения и развития неустойчивости Рэля-Тейлора;

- сопоставительным анализом между уже существующими и разработанными математическими моделями и методами, а также итогами практического использования построенных семейств математических моделей;

- результатами многочисленных численных экспериментов по расчету параметров указанных геофизических систем фрагментарно и в целом;

- тестированием всех разработанных алгоритмов численного решения дифференциальных уравнений на соответствующих тестовых задачах;

- сравнением результатов расчетов с данными спутниковых и наземных измерений.

Теоретическая и практическая значимость (полезность)

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что в результате комплексных исследований на практике реализован математический аппарат исследования процессов неустойчивости Рэля-Тейлора в ионосферной плазме, позволяющий проводить достаточно точное математическое описание, учитывать внешние возмущения естественного и антропогенного характера, что важно для развития представлений о физике околоземной плазмы. В работе исследованы фундаментальные вопросы динамики переноса плазмы и энергии в низкоширотной ионосфере Земли в различных условиях внешних воздействий. Созданные математические модели могут служить базой для проведения вычислительных экспериментов. Комплекс может быть использован также для целей

оптимального планирования экспериментальных исследований ионосферы.

На защиту выносятся:

1. Результаты численного исследования ионного состава плазменных пузырей, показывающие, что в процессе развития неустойчивости Релея-Тейлора происходит вынос молекулярных ионов, прежде всего NO^+ , на высоты внешней ионосферы.

2. Результаты численного исследования температурных режимов плазменных пузырей, показывающих, что процесс развития плазменных пузырей на развитой стадии приводит большим ионной и электронной температурам, и впервые показано, что эффект нагрева происходит в режиме с обострением, когда ионная температура внутри пузыря за время 10 – 20 с повышается до 9000 К и выше.

3. Результаты численного исследования инициализации пузырей внутренними гравитационными волнами, показывающие, что прохождение ВГВ приводит к возникновению неоднородностей плазмы, развивающихся в результате неустойчивости Рэлея-Тейлора в плазменные пузыри только при выполнении условий резонанса.

4. Результаты численного исследования, показывающие, что грибообразная зональная форма пузыря, вытягивание пузыря вдоль силовых линий геомагнитного поля, зональная асимметрия являются своеобразными инвариантами явления слабо зависимыми от условий генерации пузыря и параметров среды, при этом количественные параметры процесса существенно зависят от фонового зонального электрического поля и меридиональной составляющей термосферного ветра, в частности инверсия знака вертикального дрейфа приводит к подавлению развития пузыря, только если инверсия происходит до подъема переднего фронта пузыря выше максимума F-слоя ионосферы.

5. Результаты численного исследования инъекции плазмогасящих соединений, показывающие, что инъекция в нижнюю часть экваториальной F-области умеренных количеств плазмогасящих соединений может приводить к генерации плазменных пузырей и впервые были получены количественные характеристики этого явления для различных плазмогасящих соединений.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Во всех проведенных исследованиях автор принимал участие в постановке задач, разработке методов их решения и анализе результатов. Модель ионосферно-термосферных процессов в виде шарового слоя и исследования с использованием этой модели проведены совместно с М.А. Никитиным В.Е. Захаровым. Совместно с С.В. Мациевским и М.А. Никитиным построены

модели среднемасштабных процессов и проведены исследования неустойчивости Рэля-Тейлора. Построение 3-х мерных математических моделей, численных методов решения уравнений для всех моделей, а также основная часть расчетов, результаты которых представлены в диссертации, выполнено автором лично.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы на различных этапах ее выполнения докладывались и обсуждались на международных и межведомственных конференциях и совещаниях:

Новосибирский Институт геологии и геофизики СО АН СССР:
Применение ЭВМ в исследованиях физических процессов в атмосфере и ионосфере, 1986

8-ой, Ростов, 1986 и 9-ый, Звенигород, 1988 семинары по математическому моделированию ионосферы

Математическое моделирование в естествознании и технологии:
Всесоюзная школа-семинар молодых ученых и специалистов. Светлогорск, 1988.

Всесоюзное совещание «Математические модели ближнего космоса», Москва, 1988.

Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой, V конференция, Ташкент, 1989

Nonlinear World: Proceedings of the IV International Workshop on Nonlinear Processes in Physics, Kiev, 1989

10-м Международном семинаре по математическому моделированию ионосферы (г.Казань, 1990)

Cospar Colloquium on Ionospheric Physics. Taipei, Nov. 9-12, 1993.
Institute of Space Science, National Central University

XXV научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников, аспирантов и студентов, Калининград, КГУ, 1993

XXIX научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников, аспирантов и студентов, Калининград, КГУ, 1998

Proceedings of the 2nd International Workshop held at St. Petersburg, Russia, June 29 - July 3, 1998

XXX научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников, аспирантов и студентов, Калининград, КГУ, 1999

Доклады международного математического семинара к 140-летию со дня рождения Давида Гильберта из Кенигсберга и 25-летию математического факультета. (Секция "Математические методы в информатике"), Калининград, 2002

Proceedings of the 27th Annual Seminar Physics of Auroral Phenomena. Apatity, 2-5 March 2004

28th Annual Seminar Physics of Auroral Phenomena. Apatity, 1-4 March 2005

Международной конференции Избранные вопросы современной математики. Калининград. 2005

6th International conference "Problems of Geocosmos" 23-26 Мая 2006г, С-Петербург

Модели в современной науке: единство и многообразие. РГУ им. И. Канта. Калининград, 2010

II Международная конференция «Высокопроизводительные вычисления – математические модели и алгоритмы», посвященная Карлу Якоби. Калининград, 3-5 октября 2013

VIII международная научная конференция «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2015), Воронеж, 21-26 сентября 2015.

Основные публикации

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 46 работах, включая 17 статей в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов докторских диссертаций.

Внедрение результатов работы

Результаты исследований использованы при выполнении НИР по научным программам ГК НТ СССР, АН СССР и Минвуза РСФСР (номера госрегистрации 810884476, 018400456630, 01860079536, 1976-1985гг.). Разработанные модели неустойчивости в различных модификациях и результаты вычислительных экспериментов используются в Институте прикладной геофизики им. академика Федорова Е.К. (г. Москва).

Отдельные результаты включены в спецкурсы по математическому моделированию.

Структура и объем диссертации

Объем и структура диссертационной работы определяется общим замыслом и логикой проведения исследований. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 253 страницы основного текста, включая 75 рисунков и 5 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, показаны научная новизна и практическая значимость результатов исследований, представлены выносимые на защиту результаты. Приведены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации. Здесь же указывается на необходимость изучения исследуемых геофизических объектов как единых систем – и обращается особое внимание на роль внешних воздействий как естественного, так и антропогенного происхождения на процессы, протекающие в этих системах. Особое внимание уделяется изучению этих процессов в экстремальных условиях. Анализируются трудности, связанные с теоретическим исследованием систем ионосфера-термосфера.

В первой главе приведен обзор литературы по экспериментальным и теоретическим исследованиям экваториальных ионосферных неоднородностей, рассмотрены принципы и основные методы построения математических моделей ионосферы Земли и приближения.

Исследование морфологии, физической природы и динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации является одной из ключевых задач физики ионосферы. Это вызвано не только чисто научным интересом к проблеме изучения атмосферы Земли как единой динамической системы, но и необходимостью решения ряда прикладных задач радиосвязи, радиолокации, навигации и т.п., поскольку такие неоднородности оказывают заметное влияние на характеристики распространяющихся радиосигналов. Среднемасштабные ионосферные неоднородности (ИН) с периодами $\sim 1-20$ мин вызывают диффузные отражения (F -рассеяние) в КВ диапазоне, приводят к фазовым и амплитудным мерцаниям в метровом и дециметровом диапазонах, существенно снижая эффективность функционирования спутниковых радиотехнических систем, в частности, навигационных систем GPS, GALILEO и ГЛОНАСС.

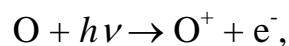
Известно, что основной вклад в мерцания регистрируемых на земле сигналов ИСЗ вносят мелкомасштабные ионосферные неоднородности с размерами порядка радиуса первой зоны Френеля dF (что для сигналов GPS составляет 150-250 м). Согласно теории слабого однократного рассеяния, для диапазона частот GPS (1.5 ГГц) предполагаются очень слабые мерцания с индексом S_4 в диапазоне значений 0.01-0.1, что не может привести к заметным изменениям амплитуды сигналов GPS. В то же время при длительной регистрации сигнала геостационарного ИСЗ MARIS AT на частоте 1.5 ГГц были зарегистрированы аномально глубокие вариации амплитуды типа одиночных импульсов длительностью от десятков до сотен секунд. Данный тип мерцаний обозначен термином "мерцания spikes-type" (мерцания S-типа). Появление колебаний S-типа связывают с дифракцией или интерференцией на изолированных ионосферных неоднородностях ("пузыри"), расположенных чаще всего в области F и, реже, в E -слое. Одна из

причин образования пузырей в авроральных и экваториальных широтах – высокая вероятность образования сильных естественных градиентов электронной концентрации и возбуждения ионосферных токов, что может привести к развитию различных видов неустойчивостей ионосферной плазмы.

Появление в ионосфере крупномасштабных акустико-гравитационных волн (АГВ), проявляющихся в виде перемещающихся ионосферных возмущений, может сопровождаться одновременным возникновением или усилением мелкомасштабных неоднородностей. При этом механизм генерации неоднородностей подобен градиентно-дрейфовой неустойчивости, роль внешнего электрического поля выполняет горизонтальная компонента скорости движения нейтральных молекул.

Среди известных механизмов генерации ионосферных неоднородностей следует выделить их образование над сейсмически активными регионами вследствие усиления литосферно-атмосферных взаимодействий в периоды подготовки сильных землетрясений, приводящих к активной генерации АГВ. Эти волны, распространяясь до ионосферы, создают возмущения плазмы, достаточные для возбуждения плазменных неустойчивостей, приводящих к возникновению ионосферных неоднородностей различных масштабов, что может использоваться для предсказания землетрясений. В связи с необходимостью в данном случае выделения ионосферных неоднородностей атмосферного происхождения становится актуальным вопрос о генерации ионосферного возмущения этими механизмами. Оптимальными «модельными» источниками являются волновые импульсы, распространяющиеся в атмосфере. Согласно модельным представлениям, такое волновое возмущение распространяется вверх с нарастанием амплитуды и достигнув ионосферных высот, может приводить к генерации неоднородностей нижней ионосферы.

При анализе динамики ионосферной плазмы в рамках описанных явлений учитывалось следующее. [Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. Изд-во «Наука». М. 1974 г. 256 с.]. В исследуемой области, которой соответствуют высоты примерно от 90 до 600 км газ слабо ионизирован, т. е. в области E $n_e \sim 10^4 - 10^5 \text{ см}^{-3}$, $n_n \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$, т. е. степень ионизации $n_e/n_n \sim 10^{-8} - 10^{-9}$ (n_e и n_n – концентрации электронов и молекул соответственно). В области F $n_e \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ и $n_e/n_n \sim 10^{-4}$ даже в районе максимума n_e . Термическая ионизация в ионосфере не играет решающей роли. При $z < 600 \text{ км}$ в ионосфере преобладают фотохимические процессы. В частности, в области F основным процессом, обеспечивающим возникновение плазменной компоненты, является реакция ионизации атомарного кислорода O под действием ультрафиолетового (и рентгеновского) излучения Солнца:



где e^- – электрон, образовавшийся под действием способного вызвать ионизацию кванта $h\nu$. Нейтрализация электронов и ионов O^+ происходит в

области F по двухступенчатой схеме, первый этап – реакция перезарядки с молекулами, второй этап – рекомбинация промежуточных молекулярных с электронами. Температура ионосферной плазмы существенно меняется с высотой от примерно 250 °К на высоте 90 км до 3000 – 4000 К на высоте 600 км. Кроме этого имеются заметные различия между электронной T_e и ионной T_i температурами и вместе с этим электронная и ионная температуры существенно меняются в течение суток.

Важным параметром, характеризующим плазму, является дебаевский радиус r_D , который изменяется в ионосфере на высотах от 90 до 600 км от 0.001 м до 0.07 м, что значительно меньше размеров исследуемых неоднородностей и других характерных параметров, поэтому корректно использование условия квазинейтральности ионосферной плазмы. Еще одна существенная характеристика – длина свободного пробега. В ионосфере можно говорить о длинах свободного пробега нейтральных молекул l_n , ионов l_i и электронов l_e . Длины свободного пробега l_n , l_i и l_e до высоты около 200 км примерно одинаковы, а выше 200 км $l_i < l_n$, в частности на высоте 400 км $l_i \approx 200$ м, что также существенно меньше масштабов рассматриваемых процессов.

Для динамики ионосферной плазмы, важен учет влияния магнитного поля Земли. На интересующих нас высотах влияние ионосферных токов на магнитное поле незначительно, и в работе принимается модель магнитного поля в виде диполя.

Итак, плазма в рассматриваемых случаях является классической, низкотемпературной, идеальной.

Современные теоретические модели процессов в ионосферной плазме Земли строятся на основе ряда физических приближений – кинетическом, гидродинамическом, диффузионном. В первом случае считается, что ионосферная плазма достаточно разряжена, чтобы считать столкновение частиц бинарным, а внешние поля изменяются медленно по сравнению со временем взаимодействия частиц при столкновениях, что позволяет описывать ионосферную плазму системой кинетических уравнений.

Рассматриваемая в работе ионосферная среда должна рассматриваться как многокомпонентная (минимум трехкомпонентная – электроны, ионы и нейтральные частицы), а для большинства решаемых в работе задач существенно присутствие различных сортов ионов (как положительных, так и отрицательных) и наличие разных нейтральных компонент.

В неравновесной смеси поведение каждой из частиц сорта α можно описывать с помощью функции распределения $f_\alpha(\vec{V}_\alpha, \vec{r}, t)$, зависящей от скорости \vec{V}_α , координат \vec{r} и времени t и удовлетворяющей системе кинетических уравнений Больцмана-Власова (достаточно полный кинетический подход рассмотрен в работах Гершмана Б.Н. «Динамика ионосферной плазмы», Ивановского А.И., Репнева А.И., Швидковского Е.Т.

«Кинетическая теория верхней атмосферы» и других). В общем случае последовательный кинетический подход является крайне сложным для численного решения, поскольку приводит к шестимерной нестационарной системе дифференциальных уравнений. Однако в соответствие со сделанными оценками для рассматриваемых в работе явлений можно ограничиться более простым подходом, основанным на использовании вытекающей из кинетического уравнения совокупности уравнений переноса, получаемых применением операции усреднения по скоростям V_α . При этом подходе мы обращаемся к уравнениям, содержащим в качестве искомого неизвестных моменты – концентрации частиц, компоненты потока частиц, давление, тензор вязких напряжений и тензор потока тепла. Если дополнительно считать тензор потока тепла диагональным, то приходим к 13-моментному приближению Грэда. Тогда число независимых переменных для газа с частицами одного вида уменьшается до 13. Таким образом, если ограничиться 13-моментным приближением, то для частиц определенного сорта получается система уравнений, состоящая из соотношения непрерывности, закона сохранения импульса и уравнений для компонент тензора вязких напряжений и потока тепла. Указанный выше круг исследований позволяет использовать дальнейшие упрощения модели. Поэтому в работе использованы квазигидродинамические приближения, которые менее трудоемки. Остановимся на основных критериях применимости квазигидродинамических уравнений. Эти уравнения можно представить в замкнутой форме, если считать несильным нарушение локального максвелловского распределения. Для малости таких отклонений время релаксации к распределению $f_{\alpha 0}$, определяемое интервалом между столкновениями τ , должно быть достаточно малым по сравнению со временем T_0 , в течение которого происходят характерные изменения основных величин, т.е. должно выполняться неравенство $T_0 \gg \tau$, справедливое в рассматриваемых нами задачах с большим запасом ($\tau < 10^{-3} c$, $T_0 > 1c$).

Кроме этого требования, должно выполняться аналогичное ограничение на характерные пространственные масштабы L . При релаксации к максвелловскому распределению их следует сравнивать с длинами свободного пробега l . Критерий применимости гидродинамического описания приобретает вид $l/L = K_n \ll 1$, т.е. сводится к требованию малости числа Кнудсена, обычно считается что гидродинамическое описание справедливо, если $K_n < 0.2$. Процессы, рассматриваемые в работе удовлетворяют этому условию тоже с большим запасом, так как $l \approx L$ наблюдается на высотах более 1000 км.

В связи с этим в первой главе рассматриваются основные характеристики ионосферной плазмы, условия применимости гидродинамических уравнений переноса в случае близости распределения частиц по скорости к максвелловскому и записываются полная квазигидродинамическая система уравнений непрерывности, движения и

теплового баланса для нейтральных и заряженных компонент ионосферной плазмы в векторном виде, дополненная уравнениями электродинамики. Подчеркивается, что ввиду вычислительной сложности совместного решения систем уравнений ионосферной динамики для заряженных и нейтральных частиц в ряде рассматриваемых задач параметры последних задаются на основе хорошо апробированных эмпирических моделей, в частности *JASSIA*, *MSIS*, и т.д. Системы координат (СК), используемые в ионосферном моделировании: локальная декартова СК, сферическая геомагнитная СК, дипольная СК.

Результаты исследований первой главы представлены в публикациях [4; 14-36; 38-40; 42-46].

Во второй главе описывается комплекс математических и численных моделей, для моделирования низкоширотной области ионосферы с учетом возможностей модификации и управляемых режимов.

Влияние на интересующую нас область ионосферы внешних по отношению к ней областей околоземного космического пространства приближенно учитывается использованием модели ионосферно-термосферных процессов типа шарового слоя рассчитывающей параметры ионосферы и термосферы в диапазоне высот 90 – 3000 км с граничными условиями, задаваемыми на нижней и верхней сферических поверхностях. Эта модель описывает шаровой слой ионосферы глобально, что позволяет задавать корректные начальные и граничные условия для задач исследования неустойчивостей.

Наибольшие трудности при построении глобальной модели связаны прежде всего с необходимостью учета многомерности, самосогласованности и нелинейности уравнений. Исходная система уравнений фоновой модели *F*-области ионосферы состоит из трехмерных уравнений диффузии для ионов O^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ , NO^+ , уравнений для плотности нейтральной компоненты, горизонтальных компонент нейтрального ветра. Вертикальная компонента нейтрального ветра задана модельными формулами. Температуры ионов считаются совпадающими между собой, электрическое поле рассчитывается в эквипотенциальном приближении с учетом эмпирических моделей либо решением системы уравнений непрерывности электрического тока.

Многомерность модели представляет проблему ввиду значительных пространственных и временных характерных масштабов рассматриваемых явлений, обуславливающих большое число узлов дискретизации областей определения решения. Из-за невозможности совместного решения уравнений модели, применяются итерационные схемы, приводящие к дополнительным вычислительными затратам. Численное решение уравнений модели шарового слоя в дипольной системе координат приводит к проблемам, связанным с тем, что: получается чрезмерная подробность сеток в части области решения; моделируется динамика нейтральной компоненты, которая имеет

естественно выраженные высотные закономерности; имеется сильная связь заряженных частиц с нейтральными.

В связи с этим для решения уравнений модели в шаровом слое используется сферическая геомагнитная система координат и используется диффузионное приближение для ионов и уравнений теплопроводности ионов и электронов. При этом нижние граничные условия задавались при условии пренебрежения вклада процессов переноса и учета фотохимического равновесия на заданном нижнем высотном уровне. На верхнем граничном уровне (верхней сферической поверхности) при этом возникает серьезная проблема задания потоков частиц и тепла. Частично эта проблема может быть решена заданием равенства входящего и выходящего потоков в сопряженных точках полушарий для области с замкнутыми силовыми линиями магнитного поля Земли и заданием потоков по эмпирическим моделям для разомкнутых линий.

Приведены оценки вычислительных затрат на численную реализацию математических моделей ионосферы различного уровня сложности и показано, что задача моделирования ионосферы относится к группе сложных задач и требует применения высокопроизводительных вычислительных систем. Поскольку модели шарового слоя предназначены для корректного задания среды моделирования неустойчивостей Рэля-Тейлора, то в соответствии с оценками требуемых погрешностей здесь может быть применено диффузионное приближение для ионов и приближенное задание температуры и состава для нейтральной компоненты с использованием известных эмпирических моделей.

Для решения уравнений диффузии заряженных компонент в сферической системе координат разработан алгоритм построения разностной схемы, пригодный для вырожденных эллиптических операторов, на первом шаге которого факторизуется линеаризованный дифференциальный оператор уравнения, описывающий продольный перенос и диффузию, а на втором шаге дифференциальные операторы этой факторизации аппроксимируются по схемам, допускающим решение методом бегущего счета и суммарно имеющим второй порядок аппроксимации. Аппроксимация выполняется с учетом геометрической симметрии полушарий и координатной системы относительно геомагнитного экватора.

Для тестирования численных алгоритмов использован метод фиктивных источников, позволяющий использовать аналитические решения для анализа погрешностей аппроксимации. Отбор оптимальных численных алгоритмов проводился также путем их сравнительного анализа. Приводятся оценки точности математического моделирования, которая определяется погрешностями физических приближений, входных данных и численных алгоритмов и делается вывод, что погрешности численных алгоритмов не превышают 5–15% от всех остальных погрешностей.

Одним из физических механизмов, отвечающих за формирование неоднородностей, являются плазменные неустойчивости. Одним из основных видов неустойчивостей среднего масштаба в экваториальном F -слое ионосферы является неустойчивость Рэля-Тейлора. Формируемые при этом неоднородности (пузыри) усиливаются и перемещаются вверх выше максимума F -слоя ионосферы. При этом они вытягиваются вдоль силовых линий магнитного поля Земли вследствие процессов продольной диффузии. Основными механизмами генерации ионосферных пузырей и факторами, влияющими на эти процессы, являются:

- генерация пузырей внутренними гравитационными волнами;
- механизм генерации пузырей в F -слое облаками в E -слое;
- влияние проводимости E -слоя на динамику пузырей;
- механизмы выноса молекулярных ионов на большие высоты;
- возможность изоляции пузырей на высотах выше максимума F -слоя;
- эффекты с обострением теплового режима пузырей;
- свойства системы множественных пузырей.

Для исследования этих явлений на основе гидродинамических приближений построен комплекс многомерных электродинамически согласованных нелинейных математических моделей экваториального F -слоя ионосферы. Для предварительной тестовой оценки эффектов возникновения и развития плазменных пузырей используется линейная оценка скорости вертикального дрейфа V_{ez} , которая для условий обеднения плазмы в области экватора имеет вид:

$$V_{ez} = \frac{E_{0y}}{B} + \frac{n_{e0} - n_e}{n_e} \left(\frac{g}{v_{in}} + \frac{E_{0y}}{B} \right)$$

где E_{0y} – восточная компонента электрического фонового поля, B – индукция магнитного поля Земли, n_{e0} – фоновая концентрация электронов, n_e – концентрация электронов в зоне обеднения, g – ускорение земного тяготения, v_{in} – частота столкновений между ионами и нейтралами. В частности для характерных условий в вечерней зоне экваториальной F -области получаем $V_{ez} \approx 250 - 2500 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Вторая тестовая оценка – линейный инкремент неустойчивости Рэля-Тейлора (γ) – имеет вид:

$$\gamma = \left(\frac{g}{v_{in}} + \frac{E_{0y}}{B} \right) \frac{\partial \ln n_e}{\partial z} - \nu_R$$

где ν_R – частота рекомбинации. Наличие положительных значений γ приводит на линейной стадии к экспоненциальному росту обеднения с характерным временем γ^{-1} . Оценки значений γ приводят к величинам $10^{-4} - 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Согласно обсуждению главы 1, общепринятую систему уравнений Максвелла и гидродинамических уравнений с учетом электромагнитных сил для заряженных частиц N сортов можно записать в виде, включающем N уравнений непрерывности, $3N$ уравнений движения ионов и электронов, N уравнений теплопроводности ионов и электронов, три уравнения непрерывности электрического тока и три уравнения потенциальности электрического поля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla(n_j \vec{V}_j) &= Q_j - L_j \\ \frac{\partial \vec{V}_j}{\partial t} + (\vec{V}_j \nabla) \vec{V}_j &= -\frac{\nabla p_j}{n_j m_j} + \frac{e}{m_j} (\vec{E} + \vec{V}_j \times \vec{B}) - \sum_{l \neq j} v_{jl} (\vec{V}_j - \vec{V}_l) - v_{jn} (\vec{V}_j - \vec{V}_n) + \vec{g} \\ \frac{3}{2} n_j k \left(\frac{\partial T_j}{\partial t} + (\vec{V}_j \nabla) T_j \right) + p_j \nabla \vec{V}_j + \nabla \vec{q}_j &= G_j - P_j \\ \nabla \times \vec{E} &= 0 \\ \nabla \vec{J} \equiv \nabla \sum e_j n_j \vec{V}_j &= 0 \end{aligned}$$

где j – номер заряженной частицы, n_j , \vec{V}_j , Q_j , L_j , m_j , e_j , p_j , v_{jn} , v_{jl} , T_j , \vec{q}_j , G_j , P_j – соответственно концентрация, дрейфовая скорость, скорости образования и потерь, масса, заряд, давление, частоты соударений с нейтралами, частоты соударений между заряженными частицами, температура, плотность теплового потока, скорость нагрева и скорость охлаждения частиц сорта j ; k – постоянная Больцмана; \vec{J} – плотность тока; \vec{E} – напряженность электрического поля. Итого получаем систему уравнений для параметров состояния среды n_j , \vec{V}_j , T_j , \vec{J} , \vec{E} .

Опишем далее приближения модели, использованные в исследованиях. Вследствие замагниченности ионосферной плазмы F-области процессы переноса вдоль магнитного поля будут контролироваться столкновениями, а поперек поля – дрейфовым движением. Из-за сильной анизотропии, обусловленной магнитным полем Земли, процессы диффузии и теплопроводности в области F и во внешней ионосфере происходят главным образом вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Для этого набора моделей выберем дипольную систему координат (α, φ, β) по той причине, что магнитное поле Земли с достаточной точностью аппроксимируется дипольным приближением. При исследовании неустойчивости, в силу достаточно большой частоты столкновений с нейтралами, для поперечной к силовым линиям магнитного поля Земли компоненте скорости можно использовать диффузионное приближение:

$$\frac{d\vec{V}_{\perp j}}{dt} = 0$$

Это приближение в большинстве решаемых задач используется и для продольной компоненты скорости. Тогда скорости будут вычисляться по формуле:

$$\vec{V}_{\perp j} = \hat{v}_j \left(\vec{E} + \frac{B}{a_j} \vec{A}_j \right)$$

где \hat{v}_j – аналог тензора подвижности. Для плотности тока получаем, что $\vec{J} = \hat{\sigma} \vec{E} + \vec{A}$, где $\hat{\sigma}$ – тензор проводимости.

Локальные педерсеновские и холловские проводимости σ_p и σ_h определяются через основные параметры столкновительной замагниченной плазмы формулами, представленными в работе [Гуревич А.В., Крылов А.А., Цедилина Е.Е. Электрическое поле в магнитосфере и ионосфере Земли // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. -М.: Наука, 1975.-Вып.35.-С.85-150.]. Нейтральность ионосферной плазмы на исследуемых временных и пространственных масштабах поддерживается с высокой точностью, поэтому:

$$\sum e_j n_j = 0.$$

Наконец, благодаря условию электростатики:

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

электрическое поле потенциально:

$$\vec{E} = -\nabla U,$$

где U – потенциал электрического поля.

Поскольку плотность электрического тока, как и скорости заряженных частиц, можно вычислить исходя из алгебраических выражений, они тоже не включаются в окончательную систему. Таким образом, в диффузионном приближении получаем систему уравнений с неизвестными n_j для $j > 1$, T_j , U :

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla(n_j \vec{V}_j) = Q_j - L_j$$

$$\frac{3}{2} n_j k \left(\frac{\partial T_j}{\partial t} + (\vec{V}_j \nabla) T_j \right) + p_j \nabla \vec{V}_j + \nabla q_j = G_j - P_j$$

$$\nabla(\hat{\sigma} \nabla U) = \nabla \vec{A}$$

Для дальнейшего упрощения модели используем факт высокой проводимости вдоль геомагнитного поля, поэтому можно использовать свойство эквипотенциальности, что позволяет после интегрирования трехмерного уравнения для потенциала вдоль силовых линий получить трехмерную модель с двухмерным уравнением для потенциала:

$$\frac{\partial}{\partial S_\alpha} \left(\Sigma_p \frac{\partial U}{\partial S_\alpha} + \Sigma_h \frac{\partial U}{\partial S_\varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial S_\varphi} \left(\Sigma_p \frac{\partial U}{\partial S_\varphi} - \Sigma_h \frac{\partial U}{\partial S_\alpha} \right) = Q$$

где Σ_p , Σ_h , Q – соответственно интегральные проводимости и интегральные источники тока, S_α , S_φ – метрические координаты.

Следующее упрощение связано со свойствами большинства достаточно развитых среднемасштабных экваториальных неоднородностей, которые, согласно данным наблюдений и численных трехмерных экспериментов на трехмерной модели, сильно вытянуты вдоль силовых линий и остаются такими при своем движении. Будем считать эти неоднородности двумерными и описывать их динамику в плоскости геомагнитного экватора двумерными уравнениями, получаем двумерную модель развитых неоднородностей:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla_\perp (n_j \vec{V}_j) &= Q_j - L_j \\ \frac{3}{2} n_j k \left(\frac{\partial T_j}{\partial t} + (\vec{V}_j \nabla_\perp) T_j \right) + p_j \nabla_\perp \vec{V}_j + \nabla_\perp q_j &= G_j - P_j \\ \nabla_\perp (\delta \nabla_\perp U) &= \nabla_\perp \vec{A} \end{aligned}$$

Начальные значения задавались с использованием фоновой ионосферно-термосферной модели в результате численных расчетов на установление до получения периодического решения уравнений модели шарового слоя или в случаях, не требующих конкретной привязки к гелиогеомагнитным условиям, эмпирическими формулами, в частности профилями Чепмена:

$$n = n_{\max} \cdot \exp \left(-\frac{z - z_{\max}}{h} + 1 - \exp \left(-\frac{z - z_{\max}}{h} \right) \right),$$

где n – концентрация ионов, n_{\max} – значение максимума концентрации, h – масштаб высот, z – высота, z_{\max} – высота максимума концентрации, параметры этих формул выбирались в большинстве расчетов по минимуму отклонений этого профиля концентраций от рассчитанных по фоновым или эмпирическим моделям.

При непосредственном запуске механизмов ионосферных неустойчивостей эти начальные значения дополнялись начальными возмущениями.

Описанные математические модели в своем составе имеют три сильно связанные компоненты – систему уравнений поперечного переноса, эллиптическое уравнения для потенциала электрического поля и систему уравнений переноса для концентраций частиц и ионной и электронной температур вдоль силовых линий магнитного поля Земли, которые для разных приближений могут быть гиперболическими и параболическими. При решении этой сильно связанной системы следует учитывать особенность модели, состоящую в усилении неоднородностей решения механизмами неустойчивости Рэлея-Тейлора. Это накладывает требования обязательной монотонности схем (и свойства неувеличения полной вариации).

Решение уравнений моделей в соответствии с их структурой проводилось с помощью комбинации алгоритмов решения уравнений продольной диффузии, поперечного переноса и уравнения для потенциала электрического поля. Для улучшения качества совместного решения этих сильно связанных уравнений и для обеспечения монотонности конечно-разностных схем использовались следующие итерации: по нелинейности отдельно в каждом уравнении теплопроводности; по связям между уравнениями теплопроводности для ионов и электронов; по связям между уравнениями непрерывности концентраций и уравнениями потенциала.

Специфические особенности модельных уравнений такие как нелинейность, сильные изменения коэффициентов уравнений по пространственной координате, большие пространственно-временные характерные масштабы, наличие сложных фотохимических процессов и ряд других не позволяют непосредственно применить хорошо известные в практике численные алгоритмы.

В связи с этим предложены способы модификации ряда численных алгоритмов, проведен поиск наиболее оптимальных из них, а также анализ точности и устойчивости. Рассмотрены также способы организации итерационных процессов по нелинейности и связанности уравнений в системах уравнений. Проведены исследования чувствительности решений на сгущение разностной сетки по пространственной и временной координате. Использован метод суммарной аппроксимации, что позволяет разбить систему уравнений моделей на последовательно решаемые подсистемы.

Большое число уравнений модели, нелинейность и сложный вид коэффициентов уравнений не позволяло использовать классические методы анализа устойчивости алгоритмов, поэтому качественный и количественный анализ различных современных методов газовой динамики проводится комплексным путем с использованием таких методов как метод "замороженных" коэффициентов, метод дискретного возмущения, метод Неймана в комбинации со сравнением с результатами решения распространенных модельных задач.

Для решения двумерных уравнений переноса были применены явные схемы 1-го и 2-го порядка аппроксимации. Схемы первого порядка с противопотоковыми разностями применялись в ранних работах автора. Их применение было оправдано тем, что временной шаг выбирался по условию устойчивости Куранта так, что максимальное значения числа Куранта было равно 1, это приводило к малым погрешностям в области пузырей, а вдали от них значения числа Куранта были близки к нулю, что тоже приводило к малым погрешностям.

В современной версии моделей были протестированы два типа разностных схем для решения уравнений переноса второго порядка точности: двумерный вариант трехслойной схемы «кабаре» с ограничителями решения для получения монотонности и схемой управления запасами для получения

консервативности. В отличие от работ [Головизнин В. М., Самарский А. А. Некоторые свойства разностной схемы «Кабаре» // Мат. моделирование. 1998, т. 10, № 1, с. 101-116] применен непрерывный ограничитель. Использование такого ограничителя уменьшает погрешности типа ступенька. Второй тип разностных схем – схемы второго порядка с ограничителями потоков (TVD-ограничители), построение которых основано на работах [Van Leer B. Upwind and high-resolution methods for compressible flow: from donor cell to residual-distribution schemes // Commun. Comput. Phys. 2006. 1, N 2. 192–206.], [М.Е. Ладонкина, О.А. Неклюдова, В.Ф. Тишкин. Исследование влияния лимитера на порядок точности решения разрывным методом галеркина. М. Мат. Моделирование. 2012, т. 24, № 12, с. 124-128] и др.

Исследования показали высокие качественные характеристики схемы «кабаре» для решения уравнений модели шарового слоя. Для моделей неустойчивости лучшей оказалась схема с TVD-ограничителями со специально подобранными «лимитерами».

Аппроксимации уравнений потенциала построены с использованием разнесенных сеток для достижения наименьшего суммарного шаблона разностных схем. Для выбора метода решения разностных эллиптических уравнений модели были проведены численные эксперименты по сравнению различных существующих методов. В частности были исследованы: прямые методы (матричная прогонка и метод вложенных сечений); метод BiCGStab; методы неполной факторизации; метод BiCGStab с предобуславливанием; многосеточные методы. В ранних реализациях моделей применялись прямые методы – безразностный вариант матричной прогонки и метод вложенных сечений, в современных версиях применяются многосеточные методы.

Эллиптические уравнения модели неустойчивости как для двумерного, так и для трехмерного приближения являются двумерными и содержат производные первого порядка, что приводит к несамосопряженности дифференциального оператора. Для слагаемых первого порядка применяется аппроксимация с направленными разностями, а для получения второго порядка аппроксимации корректирующие множители. Такое построение позволяет единообразным образом получать монотонные схемы второго порядка точности при любых соотношениях коэффициентов и шагов разностной сетки.

В современной реализации модели используется нерекурсивная реализация алгоритма $W(\mu_1, \mu_2)$ цикла. Этот процесс сходится примерно за 10 – 30 итераций до уровня погрешности $3 \cdot 10^{-10}$ от первоначальной. Для уменьшения числа итераций применялся предсказатель, что позволило уменьшить число итераций на каждом временном шаге, кроме нескольких первых, в среднем на 2–3 итерации. Время решения двумерной модели в конфигурации «уравнение переноса для 5-ти ионов и уравнение потенциала» на одном временном шаге в однопотоковом варианте на процессоре Intel

Core i3 с тактовой частотой 3.1 ГГц составляет: на сетке размером 128×192 узла в среднем 0.4 сек, на сетке размером 512×768 узла в среднем 9.7 сек.

Были проведены сравнительные расчеты на разных сетках, которые показали работоспособность численных схем, в частности при сравнении решений при пространственных шагах 2км и 4км различия в положении границ пузырей при развитой неустойчивости 1 – 3 км, различия во времени развития 10 – 50 с при общем времени развития 2000с.

Результаты исследований второй главы представлены в публикациях [1-2; 5-11; 14-19; 37; 40-42; 44].

В третьей главе приведен обзор результатов экспериментальных и теоретических исследований различных сценариев развития неустойчивости Рэля-Тейлора в низкоширотной ионосферной плазме в естественных условиях и в условиях техногенных воздействий.

Разработанный комплекс многомерных электродинамически согласованных численных моделей позволяет воспроизводить следующие явления: суточный ход и трехмерную пространственную структуру таких плазменных характеристик F-области, как концентрация заряженных частиц, их скорости дрейфа, температуры, динамические характеристики нейтральной составляющей; искусственную или естественную генерацию среднемасштабных неоднородностей в E и F-областях экваториальной ионосферы Земли с дальнейшим их морфогенезом в трехмерные плазменные неоднородности.

Были реализованы следующие численные эксперименты: исследование влияния инерционности движения плазмы и зонального внешнего электрического поля на динамику плазменных неоднородностей на основе двумерной модели; исследование конкуренции среднемасштабных неоднородностей на основе двумерной модели; подтверждение классического сценария развития ионосферных пузырей, принимающих зональную грибообразную форму и поднимающихся во внешнюю ионосферу с нарастающей скоростью; исследование параметров температурных режимов с обострением.

Основная схема численных экспериментов, результаты которых приведены в этой главе, имеет следующую структуру: задание или расчет начальных условий для фоновых концентраций плазмы; задание искусственного начального возмущения плазмы с заданными параметрами, обычно оно задавалось с помощью одномоментного применения формул для задания множественных возмущений:

Получены результаты описывающие эффекты выноса ионов NO^+ на большие высоты. Содержание этих ионов внутри развитого пузыря зависит от двух факторов: концентрации ионов NO^+ у основания F-слоя и уровня депрессии электронов внутри пузыря. Эффективность этого зависит от концентрации NO^+ на высотах 150–250км и степени депрессии электронной

концентрации, поэтому ночью процесс транспортировки ионов NO^+ на большие высоты будет ослаблен.

Рассмотрены результаты численных экспериментов по моделированию теплового режима внутри экваториальных ионосферных пузырей. Показано, что внутри пузырей тепловой режим зависит от степени депрессии электронной концентрации плазмы. Для пузырей с сильной депрессией ионная температура может значительно превосходить электронную и достигать 10000 К и выше. Обнаружена возможность развития внутри пузырей режима с обострением, когда температура ионов возрастает в несколько раз за время, много меньшее характерного времени развития пузыря.

Численные эксперименты по расчету теплового режима внутри экваториальных пузырей получены при согласованном учете основных физических факторов формирования ионосферных неоднородностей: механизма неустойчивости Рэля-Тейлора, поляризационных электрических полей, амбиполярной продольной диффузии продольного и поперечного теплопереноса, локальных процессов реальной аэрономии и теплообмена. Как показано в экспериментах, ходе развития нелинейной стадии неустойчивости Рэля-Тейлора формируется неоднородная пространственная структура с характерными особенностями экваториальных пузырей: сильная депрессия электронной концентрации внутри; грибообразная форма; подъем пузыря во внешнюю ионосферу с большой скоростью. При падении концентрации внутри пузыря на порядок по сравнению с фоновой плазмой ионная температура возрастает до 7000 К. Для депрессии электронной концентрации, достигающей двух порядков и более, разогрев ионов становится еще значительнее и достигает 20000 К. Отметим одну характерную особенность тепловой и плазменной динамики внутри пузыря на стадии максимальной депрессии электронной концентрации n_e – изменение ионной температуры происходит по сценарию режима с обострением. Так, полная температура на заключительной стадии развития пузыря меняется от 5000 до 20000 К за 0.03 от общего времени развития процесса. В реальной ионосфере этот временной интервал соответствует нескольким десяткам секунд. Показано, что в экстремально опустошенных пузырях имеет место сильное нарушение теплового равновесия с выполнением условия $T_i \gg T_e$. Полученные результаты объясняются возрастанием эффективности омического разогрева ионов при увеличении депрессии электронной концентрации внутри пузырей вследствие резкого увеличения напряженности поляризационного электрического поля при падении электронной концентрации.

Далее в работе обсуждается динамика развития множественных пузырей. Результаты численного моделирования показали, что процесс развития системы множественных взаимодействующих пузырей можно охарактеризовать рядом закономерностей: квазипериодичностью пространственно-временной структуры. Такие структуры исключают

удовлетворительное описание динамики развития пузырей в рамках стационарного приближения; опережающим развитием центральных пузырей системы при одновременном запуске всех пузырей. Такое преимущество они получают из-за деформации центральных конвективных ячеек, уменьшающей площадь ячеек, что приводит к усилению конвекции. В случае стационарного приближения в вывод прямо противоположный: сначала развиваются самые крайние пузыри; одновременным существованием не более двух сильно развитых пузырей. Другими словами, при богатом засеве ионосферы малыми возмущениями при благоприятных для неустойчивости Рэлея-Тейлора условиях в действительности разовьются лишь немногие пузыри. Это происходит благодаря нелинейному механизму взаимодействия между конкурирующими развитыми и неразвитыми пузырями, т. е. путем естественного отбора. Последние соображения согласуются с данными наблюдений ионосферы.

Результаты исследований третьей главы представлены в следующих публикациях [6-11; 18; 20-36].

В четвертой главе приведен обзор результатов теоретических исследований динамики развития ионосферных пузырей в условиях внешних воздействий. В параграфе 4.1. рассмотрены резонансные механизмы формирования пузырей внутренними гравитационными волнами. Результаты представленных расчетов указывают на то, что в зависимости от характеристик ВГВ будут меняться динамика и структура генерируемых ими ионосферных пузырей.

Наиболее важные и общие закономерности резонансного механизма: пространственный резонанс эффективно генерирует ионосферные пузыри в случаях, когда высотный интервал максимальных значений линейного инкремента НРТ приходится не менее одной характерной длины волны; зональная пространственная структура ионосферных пузырей зависит от зональной структуры ВГВ и, как правило, зональная протяженность ионосферного пузыря L связана с длиной волны λ соотношением $L \approx \lambda/4$; развитие НРТ и ионосферного пузыря на нелинейной стадии может быть охарактеризовано временем нелинейного развития t_0 , которое, как показало моделирование, приблизительно в 2 раза больше характерного времени линейной стадии НРТ. Время выхода ионосферного пузыря во внешнюю ионосферу с начала действия резонансного механизма составляет примерно $10t_0$.

В параграфе 4.2. приведены результаты численных экспериментов по модификации экваториальной F -области путем инъекции плазмогасящих соединений – N_2 и H_2O . В частности, представлены данные расчетов инъекции N_2 и H_2O на высоте 400км, т. е. на высоте, вблизи которой в дневное и вечернее время располагается максимум $F2$ -слоя. Эффекты модификации в этом случае максимальны и поэтому важно их оценить. Вместе с тем определенный интерес представляют численные эксперименты

для других условий: высот инъекции, масс инжектируемого вещества, геометрии инъекции, учет различных геофизических факторов, например ветрового увлечения. Один из результатов – вывод о том, что сравнительно умеренный выброс молекулярного водорода (~100 кг) может вызвать модификацию экваториальной F-области в достаточно большом объеме, достигающем сотен километров по высоте и широте. Существенно при этом, что значительную перестройку претерпевает высотное распределение электронной концентрации. В результате в вечерней ионосфере могут резко усиливаться условия развития Рэлей-Тейлоровской неустойчивости, так как область положительных градиентов n_e быстро перемещается по высоте вверх на 200 км. Таким образом, выброс плазмогасящих соединений H_2 и H_2O в области максимума экваториальной F-области может послужить эффективным механизмом создания области F-рассеяния. Следует отметить, что на средних широтах эффекты модификации F-области затухают значительно быстрее, чем в экваториальной F-области, хотя на этапе химической модификации эффекты сравнимы, что связано с плазмосферным резервуаром.

В параграфе 4.3. приведены результаты исследования динамики развития ионосферных пузырей при меняющихся фоновых электрических полях. Были проведены численные эксперименты, моделирующие эффекты перемены знака восточной компоненты электрического поля. В этих экспериментах знак поля изменялся в моменты времени из диапазона 1000с – 2000с считая от начала процесса. Результаты вычислений показали, что неустойчивость Рэля-Тейлора развивается по классическому сценарию с выходом образовавшегося пузыря во внешнюю ионосферу для интервала времени перемены знака вертикального дрейфа, начиная от момента времени, когда передний фронт ионосферного пузыря находится вблизи максимума F-слоя ионосферы. Для меньших интервалов знакоположительности фонового вертикального дрейфа развитие неустойчивости прекращается. Этот вывод остается справедливым и при других условиях развития одиночных пузырей и слабо взаимодействующих множественных пузырей в экваториальной F-области.

Результаты исследований четвертой главы представлены в следующих публикациях [5-11; 18; 20-36].

Пятая глава посвящена исследованию эффектов трехмерности, не укладывающихся в двумерное описание. Исследовано влияние таких трехмерных факторов, как продольная амбиполярная диффузия экваториального F-слоя и педерсеновская проводимость E-области ионосферы. Результаты расчетов показывают, что амбиполярная продольная диффузия и педерсеновская проводимость играют важную роль в НРТ в экваториальной F-области и на нелинейной стадии развития, когда электронная концентрация в неоднородности на порядок меньше чем в фоновой плазме. Влияние обоих факторов на нелинейной стадии, так же как и на линейной, определяется направленностью физических процессов

связанных с амбиполярной диффузией и проводимостью E -области. Наиболее важным проявлением амбиполярной продольной диффузии на стадии развитой НРТ является согласованное во времени опустошение плазмы вдоль всей длины силовой линии. Таким образом, амбиполярная диффузия эффективно распространяет депрессию электронной концентрации, производимую у вершины силовых линий механизмов НРТ на всю силовую линию. Данный вывод численных экспериментов хорошо согласуется с данными оптических наблюдений, где эта особенность развития НРТ хорошо проявляется. Высокая эффективность продольного амбиполярного переноса плазмы в экваториальной F -области приводит также к тому, что важное значение в динамике процесса начинает играть интегральное вдоль силовой линии содержание электронов.

Влияние меридиональной составляющей термосферного ветра на процессы развития пузырей является существенно трехмерным эффектом и не может быть исследовано на основе двумерных моделей. Расчеты показывают, что сходящийся ветер приводит к ускорению процесса, а расходящийся ветер приводит к замедлению процесса выхода пузыря в максимум F -слоя ионосферы. При этом сценарий развития процесса оказывается классическим. Исследовано влияние сквозной составляющей скорости меридионального ветра (V_0). Результаты этих вычислений показали, что неустойчивость Релея-Тэйлора развивается по классическому сценарию с выходом плазменного пузыря во внешнюю ионосферу, если значение сквозной составляющей V_0 лежат по модулю в диапазоне значений примерно до 300 м/с, при этом время выхода переднего фронта пузыря на высоту максимума F -слоя слабо меняется при значениях V_0 меньших 100 м/с, а затем начинает возрастать с ростом скорости по нелинейному закону. При увеличении значения сквозной составляющей меридионального ветра V_0 выше 300 м/с наряду с увеличением времени развития происходит значительная деформация. Таким образом, меридиональный ветер заметно влияет на процессы развития ионосферных пузырей как в количественном, так и в качественном аспектах, изменяя параметры ионосферного пузыря, и даже полностью подавляя его развитие.

Результаты исследований пятой главы представлены в следующих публикациях [5; 7-11; 18; 20-36].

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы:

Изложенные в предыдущих разделах результаты являются циклом взаимосвязанных работ по решению важной проблемы создания математических и численных моделей среднemasштабных процессов в низкоширотной ионосфере Земли, допускающих внешние воздействия и возможность управления посредством таких воздействий. При выполнении этих исследований были получены следующие новые результаты:

1. Впервые показано, что основным механизмом выноса ионов NO^+ на высоты максимума F-области и выше служит неустойчивость Рэля-Тейлора, приводящая к генерации пузыря, переносящего ионы NO^+ на большие высоты.

2. Показано, что процесс развития плазменных пузырей в результате неустойчивости Рэля-Тейлора приводит на развитой стадии плазменного пузыря к большим ионным и электронной температурам, при этом впервые показано, что эффект нагрева происходит в режиме с обострением, когда электронная температура внутри пузыря за время 10–20с повышается до 9000 К и выше.

3. Впервые было показано, что прохождение ВГВ приводит к возникновению неоднородностей плазмы, развивающихся в результате неустойчивости Рэля-Тейлора в плазменные пузыри только при выполнении условий резонанса и когда на высотный интервал максимальных значений линейного инкремента НРТ приходится не менее одной вертикальной компоненты длины волны.

4. Впервые показано, что грибообразная зональная форма пузыря, вытягивание пузыря вдоль силовых линий геомагнитного поля, зональная асимметрия являются своеобразными инвариантами явления слабо зависими от условий генерации пузыря и параметров среды. При этом внешние условия, такие как фоновое электрическое поле и меридиональная компонента термосферного ветра существенно влияют на количественные параметры процесса, в частности показано, что при инверсии знака фонового зонального электрического поля ионосферные пузыри развиваются по классическому сценарию с выходом образовавшегося пузыря во внешнюю ионосферу, если момент времени инверсии знака вертикального дрейфа происходит после подъема переднего фронта пузыря выше максимума F-слоя ионосферы, в противном случае развитие пузыря после инверсии дрейфа прекращается.

5. Показано, что инъекция умеренных количеств плазмогасящих соединений в нижнюю часть экваториальной F-области может приводить к генерации плазменных пузырей и впервые были получены количественные характеристики этого явления для различных плазмогасящих соединений.

Список работ автора по проблеме

1. Кащенко Н.М., Ишанов С.А., Мацевский С.В. Развитие неустойчивости Рэля-Тейлора в экваториальной ионосфере из стохастических ионосферных неоднородностей. // Вестник БФУ им. И. Канта. 2015. Вып. 10. С. 13-17.
2. Мацевский С.В., Кащенко Н.М., Ишанов С.А., Чемакин Д.А. 3D моделирование низкоширотной F-области ионосферы с высоким разрешением. Сборник трудов VIII международной научной конференции «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2015), Воронеж, 2015, с. 235-237.

3. Кащенко Н.М., Мациевский С.В., Ишанов С.А., Кожурова А.И. 2D моделирование развития неустойчивости Рэля-Тейлора из стохастических ионосферных неоднородностей. Сборник трудов VIII международной научной конференции «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2015), Воронеж, 2015, с. 175-176.
4. Ишанов С.А., Демин С.А., Кащенко Н.М., Мациевский С.В. 2D высотно-широтное и высотно-долготное моделирование ионосферной плазмы. Сборник трудов VIII международной научной конференции «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2015), Воронеж, 2015, с. 157-160.
5. Кащенко Н.М., Ишанов С.А., Мациевский С.В. Модель высокого разрешения низкоширотной F-области ионосферы. // Вестник БФУ им. И. Канта. 2015. Вып. 4. С. 87-92.
6. Кащенко Н.М., Мациевский С.В. Неустойчивость экваториального F-слоя ионосферы в условиях переменного электрического поля. // Вестник БФУ им. И. Канта. 2014. Вып. 10. С.30-35.
7. Кащенко Н.М., Никитин М.А. Моделирование эффектов аномальной диффузии для дренажных систем. // Математическое моделирование. Т. 25 № 12, 2013, с.44–49.
8. Мациевский С.В., Кащенко Н.М. Неустойчивость Рэля-Тейлора: сравнение 3D-моделей. Высокопроизводительные вычисления – математические модели и алгоритмы. Материалы II Международной конференции, посвященной Карлу Якоби. Калининград, 3-5 октября 2013. с.176-178.
9. Кащенко Н.М. Двумерная схема кабре с непрерывными ограничителями. Высокопроизводительные вычисления – математические модели и алгоритмы. Материалы II Международной конференции, посвященной Карлу Якоби. Калининград, 3-5 октября 2013. с. 129-130.
10. Кащенко Н.М. Численная модель процессов развития мелкомасштабных неоднородностей экваториальной ионосферы. // Вестник БФУ им. И. Канта. 2013. Вып. 10. С. 31-35.
11. Мациевский С.В., Кащенко Н.М., Ишанов С.А., Зинин Л.В. 3D-моделирование экваториального F-рассеяния: сравнение моделей M13 и SAM13. // Вестник БФУ им. И. Канта. 2013. Вып. 4. С. 102-106.
12. Смирнов О.А., Кащенко Н.М. Длинноволновые процессы в приполярной термосфере в условиях магнитосферных суббурь. // Математическое моделирование. М. 2009. том 21, № 10. с.123-128.
13. Кащенко Н.М., Шабаршин О.Н. Модель медленных течений в каналах. // Вестник РГУ им. И.Канта. 2007. Вып.10. Сер. Физико-математические науки. С. 19-21.

14. Zakharov V.E., Kaschenko N.M. Numerical integration of the elliptic type equations with the mixed boundary conditions.// Избранные вопросы современной математики. Калининград. Издательство Калининградского государственного университета. 2005 С.104-105.
15. Кащенко Н.М. Факторизация в численных методах интегрирования вырожденных эллиптических уравнений ионосферной плазмы. // Вестник КГУ. 2005. Вып.1-2. Сер. Информатика и телекоммуникации С. 65-70.
16. Zakharov V.E., Kaschenko N.M. A Study of the Coupling Between Ionospheric Circulation Disturbed By Magnetic Storm. // Proceedings of the 27th Annual Seminar Physics of Auroral Phenomena. Apatity, 2-5 March 2004. P.21-24.
17. Кащенко Н.М., Мациевский С.В. Математическое моделирование неустойчивостей экваториального F-слоя ионосферы. // Вестник КГУ. Сер. Информатика и телекоммуникации. Изд-во КГУ, вып.3, 2003. С. 59-68.
18. Кащенко Н.М., Захаров В.Е. Численный метод интегрирования системы уравнений переноса ионосферной плазмы. 2002, Калининград, Издательство КГУ, Доклады международного математического семинара, с. 287-290.
19. Zakharov V. E., Kaschenko N.M., Khudenko E. V. Coupling Between the Ionospheric Convection and the Thermospheric Circulation Disturbed by Magnetic Storms. // in PROBLEMS OF GEOSPACE 2. Proceedings of the 2nd International Workshop held at St. Petersburg, Russia, June 29 - July 3, 1998 pp. 231-236.
20. Matsievsky S.V., Kaschenko N.M., Nikitin M.A. Geomagnetic inspection and longitudinal dependences of Rayleigh-Taylor instability Low-Latitude (RTI) linear increment. // Cospar Colloquium on Ionospheric Physics. Taipei, Nov. 9-12, 1993. Abstract Institute of Space Science, National Central University s.183-187.
21. Matsievsky S.V., Kaschenko N.M., Nikitin M.A. Dynamics of ionospheric bubbles: numerical researches loquium on Low-Latitude. // Cospar Colloquium on Ionospheric Physics. Taipei, Nov. 9-12, 1993. Abstract Institute of Space Science, National Central University s.179-182.
22. Гайдуков В.Ю., Кащенко Н.М., Корнеев Н.А., Никитин М.А., Романовский Ю.А. Волновые возмущения, генерируемые в термосфере локализованными источниками. // Геомагнетизм и аэрономия. № 2, с.125, 1992.
23. Erokhin N.S., Kaschenko N.M. Matsievsky S.V., Nikitin M.A. Nonlinear Development of Holes in the Ionospheric Plasma Layer under Triggering of Rayleigh-Taylor Instability by Internal Gravity Wave. // Annales Geophysicae: Supplement to Volume 9.– 1991.– V.9.
24. Никитин М.А. Гайдуков В.Ю. Мациевский С.В., Кащенко Н.М., Романовский Ю.А. Исследование стимуляционных характеристик различных плазмогасящих соединений. // Геомагнетизм и аэрономия.- 1991.- т.31.- №6 с.1074-1079.

25. Гайдуков В.Ю., Мациевский С.В., Кащенко Н.М., Никитин М.А., Романовский Ю.А. Запуск экваториальных пузырей путем модификации E-слоя. // Геомагнетизм и аэрономия.- 1991.- Т.31.- №6. с.1042-1048.
26. Мациевский С.В., Кащенко Н.М., Кшевецкий С.П., Никитин М.А. Резонансная генерация ионосферных пузырей внутренними гравитационными волнами. // Геомагнетизм и аэрономия.- 1990.- Т.30.- №3. С. 446-451.
27. Кащенко Н.М., С.В.Мациевский, М.А.Никитин. Динамика системы множественных Рэлей-Тейлоровских ионосферных пузырей. // Геомагнетизм и аэрономия.- 1990.- Т.30.- №2. С. 281-286.
28. Ерохин Н.С., Кащенко Н.М., Мациевский С.В., Никитин М.А. Тепловой режим внутри ионосферных пузырей. // Космические исследования.-1990.- Т.28.- Вып.1. С. 85-93.
29. Erokhin N.S., Kaschenko N.M., Matsievsky S.V., Nikitin M.A. Selforganization of Rayleigh-Taylor Bubbles System. // Nonlinear World: Proceedings of the IV International Workshop on Nonlinear Processes in Physics.- Kiev, 1989.- Vol.2.
30. Erokhin N.S., Kaschenko N.M., Matsievsky S.V., Nikitin M.A. Dynamics of Ionospheric Rayleigh-Taylor Instability with Plasma Heating inside Bubbles. // Nonlinear World: Proceedings of the IV International Workshop on Nonlinear Processes in Physics. - Kiev, 1989. - Vol.2.
31. Кащенко Н.М., Мациевский С.В., Никитин М.А. Ионосферные пузыри: ионный состав, скорости движения плазмы и структура. // Известия вузов. Радиофизика. - 1989.- Т.32.- №11.- С. 1320-1326.
32. Кащенко Н.М., Мациевский С.В., Никитин М.А. Исследования нелинейной стадии развития неустойчивости Рэля-Тейлора в экваториальной F-области с учетом продольной диффузии и педерсеновской проводимости E-области. // Геомагнетизм и аэрономия.- 1989.- Т.29.- №4.-С. 577-582.
33. Никитин М.А., Кащенко Н.М., Гайдуков В.Ю. Романовский Ю.А. Возможности стимулирования экваториальных плазменных пузырей инъекцией H₂O. // Геомагнетизм и аэрономия.- 1989.- т.29.- №3 с.440-444.
34. Фаткуллин М.Н. Никитин М.А., Кащенко Н.М. Циклические и сезонные особенности поведения линейного инкремента нарастания неустойчивости Рэля-Тейлора в экваториальной F-области. // Геомагнетизм и аэрономия.- 1989.- т.29.- №1 с.51-55.
35. Ерохин Н.С., Кащенко Н.М., Мациевский С.В., Кшевецкий С.П., Никитин М.А. Резонансное возбуждение внутренними гравитационными волнами Рэлей-Тейлоровских ионосферных пузырей в ночной экваториальной F-области. // Препринт. М., ИКИ АН СССР.- Пр-1584.- 1989.

36. Гайдуков В.Ю., Кащенко Н.М., Никитин М.А. Романовский Ю.А. Численное моделирование модификации экваториальной F- области путем инъекции плазмогасящих соединений. // Геомагнетизм и аэрномия.- 1988.- т.28.- №3.- с.422-427.
37. Кащенко Н.М., Мациевский С.В., Никитин М.А. Эффективные численные алгоритмы решения многомерных моделей ионосферы и термосферы. // Новосибирский Институт геологии и геофизики СО АН СССР сб.: Применение ЭВМ в исследованиях физических процессов в атмосфере и ионосфере. 1987. с.73-81.
38. Никитин М.А., Кащенко Н.М. Моделирование меридионального распределения f_0F_2 низкоширотной ионосферы в магнитоспокойных условиях. // Геомагнетизм и аэрномия.- 1987.- т.27.- №4.- с.671-674.
39. Никитин М.А., Кащенко Н.М. Особенности образования расслоений в дневной экваториальной области F. // Геомагнетизм и аэрномия.- 1987.- т.27.- №3.- с.501-504.
40. Никитин М.А., Кащенко Н.М., Смирнов О.А. Влияние термосферной циркуляции на динамику ионосферной плазмы низкоширотной F-области. // Геомагнетизм и аэрномия.- 1987.- т.27.- №1.- с.33-38.
41. Никитин М.А., Кащенко Н.М. Определение погрешностей численных моделей ионосферы и термосферы с помощью метода фиктивных источников. // Геомагнетизм и аэрномия.- 1986.- т.26.- №5.- с.735-738.
42. Никитин М.А., Кащенко Н.М. Моделирование экваториальной F-области для неординарных ночных условий. // Геомагнетизм и аэрномия.- 1986.- т.26.- №4.- с.672-673.
43. Никитин М.А., Кащенко Н.М. Ионосферные эффекты сезонно-суточных вариаций электрических полей в экваториальной F-области. // Геомагнетизм и аэрномия.- 1984.- т.24.- №3.- с.393-397.
44. Кащенко Н.М., Никитин М.А. Захаров В.Е. Моделирование структуры дневной экваториальной F-области. // Геомагнетизм и аэрномия.- 1981.- т.21.- №1. с.71-77.
45. Кащенко Н.М., Захаров В.Е. Криволинейная система координат для описания геомагнитного поля, возмущенного обтеканием солнечным ветром. // Геомагнетизм и аэрномия.- 1980.- т.20.- №1.- с.159-160.
46. Кащенко Н.М., Никитин М.А. Нестационарное ионообразование в нижней ионосфере при действии гравитационных волн. // Геомагнетизм и аэрномия.- 1977.- т.17.- №4.- с.649-654.