

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Кащенко Николая Михайловича
«ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА
В НИЗКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ», представленную на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук по специальности
01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность работы. Процессы, происходящие в ионосфере Земли, оказывают существенное влияние, от распространения радиоволн и движения космических аппаратов на низких околоземных орбитах с одной стороны до погодных явлений и аварий в энергосетях – с другой. Процессы в ионосфере исследуются различными методами с помощью измерений со спутников, геофизических ракет, наземных станций до активных экспериментов. Многие явления при этом для лучшего понимания процессов и детализации исследуются на уровне активных воздействий на ионосферу.

Математические модели активных воздействий на различные геофизические системы имеют важное теоретическое и прикладное значение. 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.

Исследование физической природы, морфологии и динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации является одной из ключевых задач физики ионосферы. Это вызвано не только 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.

Акустико-гравитационные волны, внутренние гравитационные волны и другие неоднородности нейтральной составляющей ионосферы могут приводить к появлению в ионосфере крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений. Этот процесс может инициировать или усиливать мелкомасштабные неоднородности. 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 важным источником возмущения электронной концентрации. 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. 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 большого числа ионосферных процессов и использования высокопроизводительных вычислительных ресурсов. Работа актуальна в связи с потребностью исследования процессов в околоземной космической плазме в приложении к проблемам науки и решению многих прикладных задач.

Новизна диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы определяется проведенными комплексными исследованиями, в которых применены комплексы математических моделей и их численных реализаций, учитывающие специфику моделирования процессов в низкоширотной ионосфере в условиях сильных и слабых воздействий, приводящих к возникновению и развитию плазменных пузырей.

Самыми важными новыми результатами работы являются следующие. Разработан комплекс гидродинамических моделей низкоширотной ионосферной плазмы с различным уровнем приближений и разным разрешением, позволяющий численно исследовать процессы развития неустойчивости Рэля-Тейлора.

На основе проведенных автором расчетов показано, что процессы развития неустойчивости Рэля-Тейлора приводят к выносу молекулярных ионов, прежде всего NO^+ на высоты внешней ионосферы.

На основе проведенных автором расчетов показано, что процессы развития неустойчивости Рэля-Тейлора приводят к температурным режимам с обострением.

На основе проведенных автором расчетов показано, что форма плазменных пузырей, развивающихся в результате неустойчивости Рэля-Тейлора является инвариантом явления для одиночных и слабо взаимодействующих пузырей.

На основе проведенных автором расчетов показано, что эффекты воздействия на ионосферу антропогенных выбросов водорода, воды и других веществ могут приводить к эффектам генерации пузырей.

Показано, что при резонансе внутренние гравитационные волны могут приводить к развитию ионосферных пузырей.

На основе проведенных автором расчетов показано, что нестационарные внешние условия (фоновые электрические поля и меридиональная составляющая нейтрального ветра) существенно влияют на динамику развития ионосферных пузырей.

Научная и практическая ценность.

Реализован программный комплекс для исследования процессов развития неустойчивости Рэлея–Тейлора в ионосферной плазме, позволяющий учитывать внешние возмущения естественного и антропогенного характера. Важно отметить, что комплекс реализован на многопроцессорной (кластерной) вычислительной системе.

Автором исследованы фундаментальные вопросы динамики переноса плазмы и энергии в низкоширотной ионосфере Земли при различных внешних воздействиях. Комплекс математических моделей и программный комплекс могут служить основой для проведения дальнейших вычислительных экспериментов и оптимального планирования экспериментальных исследований ионосферы.

Результаты работы были доложены на многих научных конференциях и научных семинарах. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 46 работах, включая 17 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ журналов, рекомендованных для опубликования основных научных результатов докторских диссертаций.

Содержание

Текст диссертации содержит 261 страницу. Диссертация имеет традиционную структуру и состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения, списка литературы (224 источника) и трех приложений.

Во **введении** автор обосновывает актуальность темы диссертации, формулирует цели, задачи работы и выносимые на защиту положения, отмечает научную новизну и научно-практическое значение работы, вкратце описывает используемые методы.

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 необходимостью решения ряда прикладных задач радиосвязи, радиолокации, навигации и т.п. Так как ионосферные неоднородности оказывают заметное влияние на

характеристики распространяющихся радиосигналов. Среднемасштабные ионосферные неоднородности вызывают диффузные отражения в КВ диапазоне, приводят к фазовым и амплитудным мерцаниям в метровом и дециметровом диапазонах. Это существенно снижает эффективность функционирования спутниковых радиотехнических систем, в частности, глобальных навигационных систем GPS, GALILEO и ГЛОНАСС и систем Beidou и IRNSS.

Для динамики ионосферной плазмы важен учет влияния магнитного поля Земли. На интересующих нас высотах влияние ионосферных токов на магнитное поле незначительно, и в работе используется модель магнитного диполя. Плазма является классической, идеальной низкотемпературной.

Современные 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. Это позволяет описать 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.

Также рассматриваются основные характеристики ионосферной плазмы, условия применимости гидродинамических уравнений переноса в случае близости распределения частиц по скорости к максвелловскому. Приведена полная квазигидродинамическая система уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных компонент ионосферной плазмы, дополненная уравнениями электродинамики. 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. Описаны системы координат, используемые в ионосферном моделировании: локальная декартова, сферическая геомагнитная, дипольная.

В главе 2 описывается комплекс математических и численных моделей для моделирования низкоширотной области ионосферы с учетом возможностей модификации и рассмотрения управляемых режимов. Влияние на интересующую область ионосферы внешних областей околоземного космического пространства приближенно учитывается использованием модели ионосферно-термосферных процессов. Модель описывает шаровой слой ионосферы глобально, что позволяет задавать начальные и граничные условия для задач исследования неустойчивостей. Существенные трудности

при построении глобальной модели связаны прежде всего с необходимостью учета многомерности, самосогласованности и нелинейности уравнений.

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. Так как модели шарового слоя предназначены для корректного задания среды моделирования неустойчивостей Рэля-Тейлора, то для них 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 разработана разностная схема, пригодная для вырожденных эллиптических операторов. Использован вариант метода расщепления, 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. Схема строится 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 расчетов, которая определяется погрешностями физических приближений, входных данных и численных алгоритмов.

Вторая глава по сути является центральной главой диссертации. В ней приведены все математические модели, реализованные автором, вкратце описаны все разностные схемы. Описана реализация программного комплекса на кластере.

В главе 3 приведен обзор результатов исследований различных сценариев развития неустойчивости Рэля-Тейлора в низкоширотной ионосферной плазме в естественных условиях и в условиях техногенных воздействий. Разработанный программный комплекс, реализующий описанные в Главе 2 модели, позволяет воспроизводить следующие явления: суточный ход и трехмерную пространственную структуру таких 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 превращением в трехмерные плазменные неоднородности.

Основная схема численных экспериментов 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, на высотах 150–250 км и уровня депрессии электронов внутри пузыря. 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 больше. 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 аэронамики и теплообмена.

В 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.

Результаты численного моделирования показали, что процесс развития системы множественных взаимодействующих пузырей можно охарактеризовать квазипериодичностью пространственно-временной структуры. Такие структуры исключают удовлетворительное описание динамики развития пузырей в рамках стационарного приближения. Происходит опережающее развитие центральных пузырей системы при одновременном запуске всех пузырей.

В главе 4 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.

В параграфе 4.2. приведены результаты численных экспериментов по модификации экваториальной F-области путем инъекции плазмогасящих соединений.

В параграфе 4.3. приведены результаты исследования динамики развития ионосферных пузырей при меняющихся фоновых электрических полях. Была проведена численные эксперименты, моделирующие эффекты перемены знака восточной компоненты электрического поля.

Пятая глава посвящена исследованию трехмерных эффектов.. Исследовано влияние таких чисто 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 развитии неустойчивости Рэлея–Тейлора 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 определяется направленностью физических процессов, связанных с амбиполярной диффузией и проводимостью E-области. Важным проявлением амбиполярной продольной диффузии на стадии развитой НРТ является согласованное во времени опустошение плазмы вдоль всей длины силовой линии.

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.

В Приложения автором вынесен материал справочного характера константы химических реакций, частоты столкновений и параметры математических моделей разлета инжестируемых нейтральных частиц.

Достоинства работы.

К достоинствам представленной работы следует отнести разумное использование тех или иных приближений для описания динамики плазмы.

Автором использованы разностные схемы, обладающие хорошими вычислительными свойствами (схемы типа кабаре). Автор сам предложил интересные модификации разностных схем, например, как сохранить монотонность схемы при аппроксимации вырожденного эллиптического оператора.

Несомненным достоинством работы является реализация программного комплекса на многопроцессорной системе.

Недостатки

В качестве недостатков диссертационной работы отметим следующие.

1. При обсуждении эффектов аномальной диффузии содержится ссылка на работу автора [47], это статья про численный метод решения уравнений с аномальной диффузией медленной (субдиффузией). Для аномального переноса поля в ионосферной плазме характерна супердиффузия, во всяком случае, коэффициенты диффузии Бома существенно превосходят коэффициенты для обычных механизмов. Уравнения субдиффузии и супердиффузии обладают разными свойствами, и не все методы, хорошо работающие на «медленной» аномальной диффузии, подходят для быстрой.
2. На с. 110 содержится утверждение «числа Куранта близки к нулю. Что приводит к малым погрешностям». Это не совсем верно. Для большинства схем при стремлении числа Куранта к нулю имеет место либо большая диссипация, либо большая дисперсия, а погрешности минимальны при стремлении числа Куранта к единице (для схемы кабре и к $\frac{1}{2}$). Ошибка может не успеть накопиться, если с малым числом Куранта (следовательно, малым шагом по времени) сделано небольшое число шагов.
3. В диссертации отсутствует описание варианта многосеточного метода. Если операторы проекции при реализации многосеточного метода более-менее очевидны из описания задачи, то об операторах интерполяции текст диссертации никакого представления не дает, хотя от интерполяционного оператора решение зависит довольно существенно.
4. Некоторые рисунки малоинформативны. Так, рисунок 2.13 на стр 116 в черно-белом варианте диссертации не несет никакой смысловой нагрузки. По нему невозможно сказать, насколько близки или далеки решения по разным разностным схемам друг от друга.
5. В диссертации даже при описании трехмерных эффектов отсутствуют трехмерные распределения. Наличие иллюстративного материала такого рода упростило бы понимание материала последней главы.
6. В диссертации присутствует большое количество неизбежных опечаток. Некоторые носят характер привычки («Рунге–Кутта» на с. 114 вместо принятого в настоящее время «Рунге–Кутты»), опечатка вызвана тем, что такое написание было принятым примерно до 1980 года). Некоторые опечатки носят характер курьеза (на стр. 23 в уравнение движения электронов в левой части дифференциальный оператор вошел два раза вместо одного, на стр. 46 северный магнитный полюс переместился почти на экватор $-8^{\circ}72'$ с.ш., на стр

Сведения об официальном оппоненте
 по диссертации Кашенко Николая Михайловича
**«ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА В
 НИЗКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ»** на соискание ученой степени доктора
 физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа
 и плазмы

Фамилия, имя, отчество	Лобанов Алексей Иванович
Учёная степень и наименование отрасли науки	Доктор физико-математических наук
Научная специальность, по которой оппонентом защищена диссертация	05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
Полное наименование организации в соответствии с уставом, являющейся основным местом работы оппонента	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	МФТИ
Ведомственная принадлежность	Министерство образования и науки Российской Федерации
Структурное подразделение	кафедра информатики и вычислительной математики
Должность оппонента в этой организации	профессор
Почтовый индекс, адрес организации	141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.
Телефон	+7 (495) 408-70-63
Список публикаций оппонента по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	<p>1 Н.А. Завьялова, А.И. Лобанов Численные расчеты динамики лайнера, сформированного парами меди // Матем. моделирование, 2011, 23:4, 103–119</p> <p>2. В.Е. Карпов, А.И. Лобанов Расчет динамики плазмы в плазменном прерывателе тока микросекундного диапазона // Математическое моделирование, 2011 - том 23 -№8 - с. 137-156</p> <p>3. А.И. Лобанов, В.А. Усенко Метод потоковой релаксации для решения квазилинейных уравнений параболического типа // Компьютерные исследования и моделирование, 2011, том 3 № 1 с. 47-53</p>

4. В.Е. Карпов, А.И. Лобанов Численные методы, алгоритмы и программы. Введение в распараллеливание. — М. Изд-во Физматкнига, 2014 — 192 с.

Официальный оппонент

Лобанов Алексей Иванович.

Подпись и сведения заверяю.

Учёный секретарь

Ученого совета МФТИ

Кандидат физико-математических наук,

доцент

Юрий Иванович Скалько

1 марта 2016 года

