

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кащенко Николая Михайловича на тему:
«Численное исследование неустойчивости Рэля-Тейлора в низкоширотной ионосфере»,
представленную на соискание

ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 01.02.05
– Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы диссертационного исследования.

Решение прикладных задач радиосвязи, радиолокации, навигации и т.п., требует исследования среднемасштабных ионосферных неоднородностей (ИН) с периодами ~ 1–20 мин, которые вызывают диффузные отражения (F-рассеяние) в коротковолновом диапазоне и приводят к фазовым и амплитудным мерцаниям в метровом и дециметровом диапазонах. Такие неоднородности оказывают заметное влияние на характеристики распространяющихся радиосигналов, существенно снижая эффективность функционирования спутниковых радиотехнических систем, в частности, навигационных систем GPS, GALILEO и ГЛОНАСС. Одна из основных причин экваториального F рассеяния (ESF) – образование, рост и движение вверх плазменных пузырей в низких широтах ионосферы. ESF является важной составляющей космической погоды, поскольку оно может нарушить работу систем связи и навигации. 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. Известно, что основной вклад в мерцания регистрируемых на земле сигналов ИСЗ вносят мелкомасштабные ионосферные неоднородности с размерами порядка радиуса первой зоны Френеля dF (которая для сигналов GPS составляет примерно 150–250 м). Согласно теории слабого однократного рассеяния, для диапазона частот GPS (1.5 ГГц) предполагаются очень слабые мерцания, что не может привести к заметным изменениям амплитуды сигналов GPS. В то же время, например, при длительной регистрации сигнала геостационарного ИСЗ MARIS AT на частоте 1.5 ГГц были зарегистрированы аномальные глубокие вариации амплитуды типа одиночных импульсов длительностью от десятков до сотен секунд. Данный тип мерцаний был назван как «мерцания S-типа». Появление мерцаний S-типа связывают с дифракцией или/и интерференцией на изолированных ионосферных неоднородностях (ИИН) размером порядка 10-100 км ("пузыри" и "глобулы"), расположенных чаще всего в области F и, реже, в E-слое. Подобные неоднородности могут вызывать явление F-рассеяния в КВ диапазоне. К настоящему времени остается открытой важная проблема описания генерации среднеширотных ИН. Известно, что в экваториальных широтах высока вероятность образования сильных естественных градиентов электронной концентрации и возбуждения ионосферных токов, что может привести к развитию различных видов неустойчивостей ионосферной плазмы. На средних широтах увеличение плотности и градиентов плазмы наблюдается также во время сильных магнитных бурь. Однако выявление прямой связи между увеличением градиента электронной концентрации и ростом интенсивности ионосферных неоднородностей в эксперименте затруднено, что требует привлечения методологии численного моделирования

Важным вопросом теории низкоширотных ионосферных явлений является влияние магнитных бурь на генерацию экваториальных пузырей плазмы. В ряде исследований показано, что магнитная активность может увеличить вероятность появления экваториальных пузырей плазмы. В экспериментах обнаружено, что проникновение электрических полей в начале основной фазы магнитных бурь будет усиливать в экваториальной области F вертикальный дрейф, создавая благоприятные условия для возбуждения неустойчивости и, что быстрое проникновение восточной компоненты электрического поля в экваториальную зону во время магнитных бурь может увеличить вертикальный дрейф вечером в экваториальной области F, и, как результат привести к генерации плазменных пузырей. Исследования, предшествовавшие данной работе, привели к улучшению понимания влияния геомагнитной активности на генерацию экваториальных пузырей плазмы. Однако, необходимы дальнейшие исследования, чтобы определить закономерности распространения нестационарных процессов в ионосфере, возникающих вследствие магнитных бурь, в низкие широты.

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. Возникновение мелкомасштабных неоднородностей при реализации данного механизма зависит от относительной амплитуды крупномасштабных волн - для более интенсивных АГВ наличие мелкомасштабной структуры более вероятно. Генерация мелкомасштабных неоднородностей в условиях прохождения интенсивных АГВ может реализовываться и в среднеширотной ионосфере по сходным механизмам, однако, до сих пор не получено достоверного экспериментального подтверждения эффективности такого механизма для средних широт. Среди известных механизмов генерации ионосферных неоднородностей следует выделить образование ИН в сейсмически активных регионах вследствие усиления литосферно-ионосферных взаимодействий в периоды подготовки сильных землетрясений, приводящих к активной генерации АГВ. Эти волны, распространяясь до ионосферы с возрастанием амплитуды создают возмущения плазмы, достаточные для возбуждения плазменных неустойчивостей различных масштабов. Другой механизм – прямое просачивание электрических полей в нижнюю ионосферу. Часто перед землетрясениями наблюдается появление спорадических E-слоев с электрическим нагревом, при котором температура электронов в E-слое увеличивается, в результате чего в E-слое образуются существенные неоднородности. Подтверждено, что процесс образования землетрясения сопровождается инъекцией подземных газов, таких как радон, и аэрозолей металлов в атмосферу что может также усиливать электрическое поле, просачивающееся в ионосферу. Результаты численного моделирования показывают, что внутренние гравитационные волны могут играть ключевую роль в генерации пузырей плазмы, однако, точная природа возмущений является одним из вопросов, который остается открытым. Поэтому *тема диссертационной работы*, в которой строятся взаимосвязанные комплексы моделей и эффективные численные методы моделирования возникновения и развития неустойчивостей типа Рэля-Тейлора (РТ), *является актуальной*.

Достоверность научных положений и выводов.

Достоверность полученных результатов определяется:

- физическим обоснованием механизмов возникновения и развития неустойчивости Рэлея-Тейлора;
- сопоставительным анализом между уже существующими и разработанными математическими моделями и методами, а также итогами практического использования построенных семейств численных 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 измерений и численными результатами других авторов.

В работе использованы статистически значимые наборы экспериментальных данных с должным пространственно-временным разрешением, которые позволили проследить кроме морфологических и динамические характеристики ИН: направление и скорость распространения, положение возможного источника возмущения.

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, позволяющие моделировать процессы в низкоширотной ионосфере в условиях сильных и слабых воздействий различной физической природы, приводящих к возникновению и развитию плазменных пузырей. Наиболее важные результаты диссертационной работы состоят в разработке комплекса нестационарных гидродинамических моделей низкоширотной ионосферы, позволяющего численно исследовать процессы развития неустойчивости Рэлея-Тейлора в низкоширотной ионосферной плазме с учетом влияния ионов, заряженных разнополярно, в интервале высот от нижней границы E-области до высот плазмосферы. При этом меридиональная составляющая нейтрального ветра, существенно влияют на динамику развития ионосферных пузырей как количественно, так и качественно, вплоть до подавления плазменных пузырей. 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 экваториальной ионосферы.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 253 страницы основного текста, включая 75 рисунков и 5 таблиц.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость результатов исследований. Здесь же указывается на необходимость изучения исследуемых геофизических объектов как единых систем – и обращается 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 системы ионосфера-термосфера.

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

Исследование физической природы и динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации является одной из основных задач физики ионосферы. Автор работы рассматривает среднemasштабные ионосферные неоднородности, которые 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. Появление в ионосфере крупномасштабных акустико-гравитационных волн (АГВ), проявляющихся в виде перемещающихся ионосферных возмущений, может сопровождаться одновременным возникновением или усилением мелкомасштабных неоднородностей, что зависит от возникновения резонансных условий.

Во второй главе описывается комплекс математических и численных моделей, для моделирования низкоширотной области ионосферы с учетом параметров указанных в цели исследования. Влияние на выделенную 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 100 - 1500 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.

Одним из физических механизмов, отвечающих за формирование неоднородностей, являются плазменные неустойчивости, которые в экваториальном F-слое ионосферы проявляются как неустойчивости Рэлея-Тейлора. Формируемые при этом неоднородности (пузыри) усиливаются и перемещаются вверх выше максимума F-слоя ионосферы и вытягиваются вдоль силовых линий магнитного поля Земли вследствие процессов продольной диффузии. Для исследования этих явлений в работе построен комплекс многомерных электродинамически согласованных математических моделей экваториального F-слоя ионосферы. Специфические особенности уравнений, такие как нелинейность, существенные изменения коэффициентов уравнений в зависимости от пространственных координат, а также наличие сложных фотохимических процессов и физической неустойчивости, потребовали от автора разработки вычислительно устойчивых и сходящихся к решению дискретных моделей и алгоритмов их численной реализации.

В третьей главе приведен обзор результатов теоретических исследований различных сценариев развития неустойчивости Рэлея-Тейлора в низкоширотной ионосферной плазме. Разработанный комплекс многомерных численных моделей позволяет прогнозировать следующие явления: суточный ход и пространственное распределение характеристик F-области: концентрация заряженных частиц, их скорости дрейфа, температуры, динамические характеристики нейтральной составляющей; генерацию среднемасштабных неоднородностей в E и F-областях экваториальной ионосферы Земли и т.п.. В данной главе выполнены численные эксперименты подтвердившие классический вариант изменения формы ионосферных пузырей, принимающих зональную грибообразную форму и поднимающихся во внешнюю ионосферу с нарастающей скоростью, а также изучен температурный режим плазменных дыр экваториальной F-области ионосферы и исследовано взаимодействие системы множественных пузырей.

В четвертой главе приведен обзор результатов теоретических исследований динамики развития ионосферных пузырей в условиях внешних воздействий. Исследованы следующие явления:

генерация неоднородностей экваториального F-слоя за счет увлечения плазменных компонент внутренними гравитационными волнами; изучены эффекты инжекции веществ, приводящих к возникновению молекулярных ионов и перестройке экваториальной ионосферы;

исследование динамики развития ионосферных пузырей в условиях меняющегося фонового электрического поля;

Пятая глава посвящена исследованию трехмерных характеристик ионосферных пузырей: продольной амбиполярной диффузии экваториального F-слоя и педерсеновская проводимость E-области ионосферы. Влияние меридиональной составляющей термосферного ветра на процессы развития пузырей является существенно трехмерным эффектом и не может быть исследовано на основе двумерных моделей. 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.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Таким образом, **основными научными результатами** данной работы следует считать.

1. Результаты численного исследования ионного состава плазменных пузырей, которые позволили выявить новые физические эффекты:

- в процессе развития неустойчивости Рэлея-Тейлора происходит вынос молекулярных ионов, прежде всего NO^+ , на высоты внешней ионосферы.

- процесс развития плазменных пузырей на развитой стадии приводит к большим ионной и электронной температурам, и эффект нагрева происходит в режиме с обострением, - ионная температура внутри пузыря за время 10 – 20 с повышается до температур 9000 К и выше.

2. На основе численного моделирования процессов генерации пузырей внутренними гравитационными волнами, было установлено, что прохождение внутренних гравитационных волн приводит к возникновению неоднородностей плазмы и появлению плазменных пузырей, развивающихся в результате неустойчивости Рэлея-Тейлора только при выполнении условий резонанса.

3. Результаты численного исследования, показывающие, что грибообразная зональная форма пузыря и вытягивание пузыря вдоль силовых линий геомагнитного поля, зональная асимметрия слабо зависят от условий генерации пузыря и параметров среды и 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.

4. На основе численного исследования показано, что инъекция умеренных количеств плазмогасящих соединений, в нижнюю часть экваториальной F- может приводить к генерации плазменных пузырей и впервые были получены количественные характеристики этого явления для различных плазмогасящих соединений.

Автореферат соответствует основному содержанию и полностью отражает результаты проведенного диссертационного исследования.

Результаты диссертационной работы отражены в 46 печатных работах, более 20 из которых включены в перечень изданий, рекомендованных ВАК. Работа прошла убедительную апробацию – по ее результатам сделано 13 докладов на симпозиумах, конференциях и семинарах всероссийского и международного уровня. Публикации, за исключением одной работы - под № 7 «Моделирование эффектов аномальной диффузии для дренажных систем», соответствуют теме исследования и отражают полученные лично автором результаты.

Замечания по работе.

1. При исследовании погрешности аппроксимации разностных схем в работе фактически исследуется локальная погрешность аппроксимации во внутренних узлах сетки. В частности, схемы, аппроксимирующие уравнения потенциала во внутренних узлах разнесенных сеток (соотношения (2.69) - (2.72), стр. 118-119) имеют локальную погрешность аппроксимации второго порядка относительно шагов пространственной сетки. В то же самое время аппроксимация граничных условий (2.73) имеет первый порядок аппроксимации. Так что утверждение о втором порядке точности используемых схем типа «кабаре» применительно к данной граничной задаче не является обоснованным.

2. Анализ решателей для уравнений эллиптического типа с младшими производными и несамосопряженным оператором является неполным. Например, нет упоминания об адаптивном методе скорейшего спуска. При построении методов решения подобных сеточных задач (с несамосопряженными операторами) при выборе метода целесообразно выполнять анализ сеточного числа Пекле, в зависимости от значения которого можно рекомендовать тот или иной метод. В работе отсутствует подобный анализ.

3. Имеется несколько стилистических и других ошибок, в частности, повторяется один и тот же номер (2.73) для разных соотношений (стр. 120).

Соответствие диссертации и автореферата требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней.

Указанные выше замечания не влияют решающим образом на положительную оценку диссертационной работы Н.М. Кашенко. В целом, представленная диссертационная работа является законченным, самостоятельным, научно-квалифицированным трудом в исследовании важной проблемы численного моделирования и исследования механизмов возникновения и развития неустойчивости в низкотемпературной ионосферной плазме, имеющей важное фундаментальное и прикладное значение. Диссертация соответствует требованиям п.п. 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Считаю, что автор данного исследования заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,

проректор по научно-исследовательской работе и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет»,

доктор физико-математических наук, профессор  А.И. Сухинов

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1,

e-mail: sukhinov@gmail.com, телефон: 8-(863)273-85-27

Подпись Сухинова А.И. заверяю:

Ученый секретарь ДГТУ



В.Н. Анисимов