

Отзыв

на автореферат диссертации Н.М. Кащенко "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.

В диссертации Н.М. Кащенко на основе численных экспериментов проведены исследования процессов развития в экваториальной ионосфере неустойчивостей типа Рэлея-Тейлора (НРТ) для разных воздействий и явлений, которые приводят к развитию этих неустойчивостей, разработаны математические и численные модели средне-масштабных явлений в низкоширотной ионосфере Земли, ориентированные на анализ указанных процессов. Для выполнения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи: 1) исследование механизмов инициализации и процессов развития НРТ с помощью нового комплекса нестационарных математических моделей низкоширотной ионосферы, описывающих вариации ее параметров с разным уровнем приближений в условиях различного типа воздействий как естественного, так и техногенного характера; 2) анализ на основе развитых методов эффектов естественных и техногенных воздействий на низкоширотную ионосферу, связанных с НРТ.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений с общим объемом 253 страницы основного текста. Список работ автора по теме диссертации содержит 49 статей.

Научная новизна диссертационной работы связана с разработкой и применением комплексов математических и численных моделей, позволяющих моделировать процессы в низкоширотной ионосфере при сильных и слабых воздействиях разного характера с генерацией плазменных пузырей, учитывать положительные и отрицательные ионы. Это дает корректное описание динамики низкоширотной околоземной плазмы в интервале высот от нижней границы E-области до плазмосферы. Согласно проведенному анализу развитие НРТ приводят к переносу молекулярных ионов, прежде всего NO^+ , на высоты внешней ионосферы. Численное моделирование также показало, что воздействие на ионосферу антропогенных выбросов водорода, воды и других веществ может приводить к генерации пузырей, а при выполнении условий пространственного резонанса внутренние гравитационные волны (ВГВ) способствуют формированию ионосферных пузырей (ИП), причем нестационарные внешние условия (переменные фоновые электрические поля, меридиональная составляющая нейтрального ветра) влияют количественно и качественно на динамику развития ИП. В частности, возможно подавление генерации ИП. Важно отметить, что для решения задач в рамках поставленной проблемы в диссертации на основе различных приближений разработан комплекс математических моделей, для которых выбраны, модифицированы и/или созданы численные методы решения на основе разностных схем и алгоритмов решения этих схем. На основе разработанного комплекса моделей проведены численные эксперименты с контролем качества получаемых результатов путем сравнения с результатами других работ и экспериментальных данных.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы, показаны научная новизна и практическая значимость ее результатов, представлены выносимые на защиту положения. Приведены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации. Указано на необходимость изучения исследуемых геофизических объектов как единых систем, обращается внимание на роль внешних воздействий (естественного, так и антропогенного происхождения) на динамику процессов.

В главе 1 дан обзор литературы по экспериментальным и теоретическим исследованиям экваториальных ионосферных неоднородностей, рассмотрены принципы и

основные методы построения современных математических моделей ионосферы Земли, указаны характерные параметры изучаемых процессов. Отмечено, что ионосферная среда должна рассматриваться как многокомпонентная (минимум трехкомпонентная: электроны, ионы и нейтральные частицы), а для большинства решаемых в работе задач существенно присутствие различных сортов положительных и отрицательных ионов, а также разных нейтральных компонент. Обосновано использование квазигидродинамических приближений, которые менее трудоемки. Поскольку имеется вычислительная сложность совместного решения систем уравнений ионосферной динамики для заряженных и нейтральных частиц в ряде задач параметры последних задаются на основе хорошо апробированных эмпирических моделей

В главе 2 описан комплекс математических и численных моделей для моделирования низкоширотной области ионосферы с учетом возможностей ее модификации и управляемых режимов. Исходная система уравнений фоновой модели F -области ионосферы содержит трехмерные уравнения 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 одинаковыми, электрическое поле эквипотенциально с учетом эмпирических моделей либо является решением системы уравнений непрерывности электрического тока. Даны оценки вычислительных затрат на численную реализацию математических моделей ионосферы различного уровня сложности, показано, что задача моделирования ионосферы является сложной и требует применения высокопроизводительных вычислительных систем. Решение уравнений моделей проводилось с помощью комбинации алгоритмов решения уравнений продольной диффузии, поперечного переноса и уравнения для потенциала электрического поля. Проведены сравнительные расчеты на разных сетках, показавшие работоспособность численных схем.

В третьей главе дан обзор экспериментальных и теоретических исследований различных вариантов развития НРТ в низкоширотной ионосферной плазме в естественных условиях и при техногенных воздействиях. Выполнены численные эксперименты: анализ влияния инерционности движения плазмы и зонального внешнего электрического поля на динамику плазменных неоднородностей на основе двумерной модели; исследование конкуренции среднemasштабных неоднородностей на основе двумерной модели; подтверждение классического сценария развития ИП, принимающих зональную грибообразную форму и поднимающихся во внешнюю ионосферу с нарастающей скоростью; исследование температурных режимов с обострением. Изложены результаты численных расчетов по моделированию теплового режима внутри экваториальных ИП. Показано, что внутри пузырей тепловой режим зависит от степени депрессии электронной концентрации плазмы. Для пузырей с сильной депрессией температура ионов может значительно превосходить электронную. В ходе развития нелинейной стадии НРТ формируется неоднородная пространственная структура с характерной особенностью экваториальных пузырей: сильная депрессия электронной концентрации внутри. Обсуждается динамика развития множественных пузырей. Численные расчеты показали, что процесс развития системы взаимодействующих пузырей характеризуется квазипериодичностью пространственно-временной структуры при наличии в ионосфере большого числа малых возмущений. При благоприятных для НРТ условий усиливаются лишь немногие пузыри благодаря нелинейному механизму взаимодействия между конкурирующими развитыми и неразвитыми пузырями, что согласуется с данными наблюдений ионосферы.

В четвертой главе даны результаты исследований динамики развития ИП в условиях внешних воздействий. Рассмотрены резонансные механизмы формирования пузырей (ВГВ). Результаты расчетов показали, что в зависимости от характеристик ВГВ будут меняться динамика и структура генерируемых ими ИП. Зональная прос-

транзитивная структура ИП зависит от зональной структуры ВГВ. Приведены результаты численных расчетов по модификации экваториальной F -области путем инъекции плазмогасящих соединений: H_2 и H_2O . Сделан 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. В вечерней ионосфере могут резко усилиться условия развития НРТ и выброс плазмогасящих соединений H_2 и H_2O в области максимума экваториальной F -области может послужить эффективным механизмом создания области F -рассеяния. Дан анализ динамики ИП при меняющихся фоновых электрических полях. Вычисления показали, что НРТ 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.

Пятая глава посвящена исследованию эффектов трехмерности, таких как продольная амбиполярная диффузия экваториального F -слоя и педерсеновская проводимость E -области ионосферы. Согласно расчетам 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. Наиболее важным проявлением амбиполярной продольной диффузии на стадии развитой НРТ является согласованное во времени опустошение плазмы вдоль всей длины силовой линии. Это хорошо согласуется с данными оптических наблюдений. Влияние меридиональной составляющей термосферного ветра на развитие пузырей является существенно трехмерным эффектом. Сходящийся ветер приводит к ускорению процесса, а расходящийся ветер приводит к замедлению процесса выхода пузыря в максимум F -слоя ионосферы. Таким образом меридиональный ветер заметно влияет на процессы развития ИП существенно меняя их параметры и даже может подавлять их развитие.

В заключении суммированы основные результаты диссертационной работы

Диссертация написана ясным языком. Ее результаты докладывались на 20 Международных и Российских конференциях, они опубликованы в 46 работах, включая 17 статей в журналах, рекомендованных ВАК для докторских диссертаций. .

Диссертация является законченным исследованием и автором внесен значительный вклад в развитие методов описания аномального переноса в плазменных и гидродинамических турбулентных течениях. Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях, например, в ИЗМИРАН, ИКИ РАН, ИПМ им.Келдыша, ФИАН, МФТИ. Автореферат четко отражает содержание диссертации. Содержание диссертации соответствует содержанию опубликованных работ.

Диссертационная работа Н.М. Кащенко полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Доктор физ-мат наук, профессор Н.С. Ерохин

ИКИ РАН, Москва

" 29 " февраля 2016 г.

Подпись доктора физико-математических наук, зав.отделом ИКИ РАН

Николая Сергеевича Ерохина удостоверяю

Ученый секретарь ИКИ РАН д.ф.-м.н.



А.В.Захаров